



# 研究生毕业论文

## (全日制学术型硕士申请学位)

论文题目 综合地球物理在九瑞邓家山  
矿田深部找矿中的应用研究

学位申请人 孟小杰

专业名称 固体地球物理

研究方向 地球物理信息综合处理及反演

指导教师 邓居智 教授

2014 年 6 月

Dissertation for master's degree

# EAST CHINA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

THESIS: The study of the integrated geophysical  
method to the deep prospecting in  
Dengjiashan ore district

Candidate: Meng Xiaojie

Supervisor: Prof. Deng Juzhi

Specialty: Solid geophysics

**June. 2014**



毕业论文题目：综合地球物理方法在九瑞邓家山矿田深部找矿中的应用研究 固体地球物理学 专业 2011 级硕士生姓名：孟小杰  
指导教师（姓名、职称）：邓居智 教授

## 摘要

在新一轮的深部固体矿产勘查过程中，地球物理勘查技术相对于传统的地质找矿的优势明显，现已成为深部矿产探测技术的核心。九瑞矿集区是我国长江中下游成矿带七大典型矿集区之一，目前，矿集区内的矿产勘查工作主要集中在第一深部空间（0~500m），而深部成矿预测工作尚在探索阶段。前人对邓家山矿田的矿床地质条件、特征及成因、矿石成份以及物化探等都作了大量的系统研究后，认为在矿区深部找矿可以取得重大突破。因此，本文以九瑞邓家山矿田开展综合地球物理方法研究为例，为探测深部矿产提供技术与借鉴。

论文在总结九瑞矿集区的区域地质和矿床地质特征的基础上总结了邓家山矿田的成矿地质背景，并归纳了邓家山矿田的成矿规律：1) 经历了多期构造活动的东西向紧闭褶皱与断裂是控制区内矿产分布的主要因素；2) 矿床的类型则受岩体与围岩接触带、层间破碎带、断层破碎带、构造裂隙带、碎屑岩及碳酸盐岩的岩性差异面的容矿构造控制。为开展深部找矿方法技术研究，对邓家山矿田的地层、岩（矿）石的密度、磁化率以及电阻率进行了研究，并对区域重力、磁法、可控源音频大地电磁测深、音频大地电磁测深、时间域和频率域激电测深数据进行处理和解释。对重磁数据进行滤波、延拓以及欧拉三维反褶积处理后，结合地质资料，揭示了邓家山矿田重磁场的总体特征、异常场源的分布、埋深及走向特征，为圈定成矿区域和控矿构造提供了有力的依据。对可控源音频大地电磁测深和音频大地电磁测深数据进行二维非线性共轭梯度法反演，并将可控源音频大地电磁测深（CSAMT）、音频大地电磁测深（AMT）及大功率激电测深（TDIP）反演结果结合地质资料进行对比分析，得出了CSAMT在该地区的应用效果好。将CSAMT二维反演结果结合地质和重磁资料进行地质地球物理综合解释，结果显示了区内堡下-黄柏岩倒转背斜的 $F_{10}$ 断层为岩体上涌通道，通过研究表明二叠系与三叠系地层的接触面为岩浆的运移和成矿提供了有利的条件。

论文通过对邓家山矿田进行综合地球物理方法研究，总结了九瑞地区深部找矿物探方法技术组合，为类似探测提供了技术参考。

**关键词：**邓家山矿田、深部找矿、综合地球物理、欧拉三维反褶积、电磁法

THESIS: The study of the integrated geophysical method to the deep  
prospecting in Dengjiashan ore district

SPECIALIZATION: Solid geophysics

POSTGRADUATE: Meng Xiaojie

SUPERVISOR: Prof. Deng Juzhi

## Abstract

Compared with traditional geological prospecting, geophysical exploration technologies take more advantage in the process of a new round of deep solid mineral exploration that has become the core of the deep mineral exploration technology. Jiurui ore district is one of seven ore fields in the Yangtze River metallogenic belt, mineral exploration work in the mineralization zone are mainly concentrated in the first deep space(0~500m), and the deep metallogenic prediction is still in the stage of exploratory . Predecessors had conducted a lot of systemic research to ore deposit geology conditions, characteristics and genesis of ore fields, mineral and geochemical exploration in the Dengjiashan ore district, holding that it can be a major breakthrough in the mining area of deep prospecting. Therefore, this paper takes Dengjiashan ore district as an example to carry forward integrated geophysical method research to provide technique and reference for the detecting of deep mining .

The paper summarized metallogenic geological setting of Dengjiashan ore district on the basis of summarizing regional geology and geological features of Jiurui ore deposit, and concluded the metallogenic regularity that composed of 1)the main controlling factor is E-W closed fold and fracture undergone multi period structural movement;2) the type of deposits is controlled by the lithologic differences of the ore structure between rock mass and surrounding rock contact zone, interlayer fracture zone, fault fracture zone, structural fissure zone, clastic rocks and carbonate rocks. In order to conduct the study of deep prospecting approaches, we had collected the stratum, rock density, magnetic susceptibility and electrical resistivity of Dengjiashan ore district, and completed processing and interpretation of the collected data from gravity, magnetic, CSAMT, AMT and TDIP. After filter, continuation, and 3D Euler deconvolution of gravity and magnetic data, we gave the general characteristics of gravity and magnetic field, source distribution , buried depth and direction of Dengjiashan ore district combining with geological material, which provided the powerful basis for the delineating mineralization regional and ore-controlling structure. Moreover, we conducted the 2D NLCG inversion of the CSAMT and AMT data and compared their inversion results with TDIP result combining geologic information to obtain the fact that the application of CSAMT is more favorable well. We took the inversion result of CSAMT incorporated with geology and gravity and magnetic data into geological and geophysical comprehensive interpretation, and the

final result shows that  $F_{10}$  of overturned anticline of Baoxia-huangbaiyan is the rock chung channel, and the interface of Permian and Triassic stratigraphic provides favorable conditions for the migration and mineralization of magma.

The paper summarized the composition methods used for prospecting deep deposits in Jiurui ore district by means of the study of the integrated geophysical methods in Dengjiashan ore district, which offers technical reference for similar exploration.

**key words:** Dengjiashan ore filed, deep prospecting, integrated geophysical, Euler 3D deconvolution, electromagnetic prospecting

# 目录

1 绪论.....	1
1.1 选题依据.....	1
1.2 地球物理勘查方法及深部矿产勘查现状.....	2
1.3 九瑞矿集区矿产勘查现状以及存在的问题.....	3
1.4 本论文结构与安排.....	5
2 区域地质背景及矿床地质特征.....	7
2.1 区域地质背景.....	7
2.1.1 区域地层.....	7
2.1.2 区域构造.....	8
2.1.3 区域岩浆岩.....	8
2.2 矿床地质特征.....	8
2.2.1 地层.....	10
2.2.2 构造.....	11
2.2.3 岩浆岩.....	12
2.2.4 围岩蚀变.....	13
2.3 矿区成矿类型和成矿规律.....	14
2.4 矿区地层及岩(矿)石物性特征.....	14
3 重磁数据处理与解译.....	19
3.1 重力数据处理.....	19
3.1.1 矿区重力场特征.....	19
3.1.2 解析延拓法重力异常分离.....	20
3.2 磁法数据处理.....	22
3.2.1 矿区磁异常特征.....	22
3.2.2 Butterworth 滤波.....	24
3.2.3 化极处理.....	25
3.2.4 解析延拓处理.....	27
3.3 欧拉 3D 反褶积解释.....	29
3.3.2 重磁欧拉 3D 反褶积反演与解释.....	31
4 电磁法数据处理及解译.....	33
4.1 电磁测深方法原理简介.....	33
4.1.1 音频大地电磁测深方法原理.....	33
4.1.2 可控源音频大地电磁测深方法原理.....	34
4.1.3 时间域激电测深方法原理.....	36
4.2 非线性共轭梯度反演理论基础.....	37
4.3 多种电磁测深方法效果对比.....	38
4.4 矿区电性结构特征及地质解释.....	40
5 结论与建议.....	45
5.1 结论.....	45
5.2 建议.....	46
致谢.....	47
参考文献.....	49

# 1 绪论

## 1.1 选题依据

自进入 21 世纪以来,我国经济总量和工业化发展进程取得了令人瞩目的成就,为了维持这种大好的局面,矿产资源的消耗量日益增加;由于目前国内大部分老矿山开采量逐渐减少,再加上各种矿产资源的储备不足,导致对国外资源的依赖性日益加大,严重制约着我国社会主义现代化的进程。目前我国大部分矿产资源主要限于第一深度空间(0~500m)深度范围内开发,且在这一深度范围内找矿能取得新发现的可能性很小,而在第二深度空间(500~2000m)找矿由于技术水平的限制,故这一深度范围内资源探测和开采的程度不高<sup>[1,2]</sup>。目前国内外在深部找矿的成功的实例表明,在第二深度空间范围内的矿产资源开采潜力是十分巨大的<sup>[3~8]</sup>。因此,为了解决国内紧张的矿产资源供需问题,在我国大力开展深部找矿是很有必要的。

长江中下游成矿带是我国著名的成矿带之一,位于扬子板块北缘的长江断裂带内,主要由宁镇、宁芜、铜陵、庐枞、贵池-安庆、九瑞、鄂东南七大典型矿集区<sup>[9]</sup>组成,是国内重要的铜铁多金属矿产基地。20 世纪 50~70 年代,在该成矿带开展了大量的探测工作,但矿产勘查主要集中在 0~500m 深度范围内,而在深部成矿预测工作方面未能深入。近年来在长江中下游成矿带开展的大量找矿工作表明,该成矿带中深部范围内取得找矿突破的可能性是很大的<sup>[9]</sup>。然而,关于深部找矿的地质研究、勘查方法以及找矿技术路线还处在探索阶段,因此,深部找矿在实际过程中遇到了不少的困难。国际上运用地球物理方法寻找深部矿、隐伏矿床的一种思路是根据区域预测和已知矿点,分三个层次充分发挥地球物理勘查深部结构的能力,进行地质、地球物理与地球化学综合研究,将深与浅,点与面,异常与矿床,矿床与成因联系起来,在构造演化中认识矿床,确定其时空位置<sup>[10,11]</sup>。此外,通过加强深部成矿理论的研究和研发新的勘查技术方法以及对现有的地球物理方法的分辨能力、抗干扰能力、探测深度等方面能力不能满足深部找矿需求的问题加以改进<sup>[12]</sup>,从而使深部矿产勘查工作走向以较小的代价获取更大的收益的道路。

九瑞矿集区位于江西省九江市瑞昌县,地处下扬子成矿省中段,是我国重要的铜矿矿集区—是我国长江中下游成矿带七个大型的矿集区之一<sup>[13~15]</sup>,自 20 世纪 80 年代以来先后发现和探明了大中小型矿产地 70 余处,探明资源潜在价值数千亿元,区内著名的有城门山铜矿、武山铜矿、香炉山钨矿三个特大型矿床以及洋鸡山金矿、丁家山铜矿、吴家金矿、金鸡窝银矿、白杨畈银矿等中小型矿床。邓家山矿田主要由邓家山矿区和东雷湾矿区组成,位于九瑞矿集区北部,城门山-丰山洞聚岩聚矿构造北端,西部紧邻丰山洞、鸡笼山大型铜多金属矿床,南东与武山铜矿相邻,通过对邓家山矿田的地质特征、成矿机制总结以及近年来开展



的多项勘查工作和研究成果显示,该区具有找大型矿床的潜力。目前,该区域浅部露头矿的勘查工作程度高,而深部成矿预测工作因当时技术条件限制未能深入,地球物理方法在深部找矿的技术有效性需要进一步总结。因此,通过在该矿区开展多种地球物理方法勘查工作结合区内已有的地质、化探等其他方法的资料进行分析,为圈定矿区内的成矿有利区域和深部成矿预测提供有力的地球物理证据。

## 1.2 地球物理勘查方法及深部矿产勘查现状

由于深部矿产埋藏比较深、矿化信息较弱,随着探测深度的不断加大,地球物理勘查方法获取可靠信息难度不断地增加,从而影响地球物理方法的可靠性、准确性。因此,深部找矿对现有的地球物理勘查方法提出了更高的要求和挑战。随着科技的发展,地球物理方法仪器和软件在近几年内取得了很大的进步,相对以往,当今地球物理仪器在高精度、高分辨率、探测深度大及抗干扰能力等方面有很大的优势,满足了目前深部矿产勘查的要求。在重磁方面,CG-5 重力仪由于其自动化程度高,极大地减轻了工作人员的负担,从而使得野外工作效率有了明显的提高;由 GEM 公司推出的高精度磁力仪,除了 GPS 实现导航与自动定位的功能外,还拥有将多个探头组合起来同时测量垂直、水平梯度及电磁场等多个参数的能力,此外,磁力仪的灵敏度、采样率、数据储存量及噪声水平等方面相对于以往有极大的提高。在重磁数据处理软件方面,Geosoft 和 Encon technology Pty Ltd 公司分别推出了 Oasis montaj 和 Modelvision,其中 Oasis montaj 拥有功能十分强大的重磁数据处理模块,使得在重磁数据处理方面能取得很好的效果。而 Modelvision 除了可用于建立重磁正反演模型及数据处理外,还可基于 IGRF 快速查询地磁要素以及基于 Euler 公式的 AUTOMAG 磁性源体三维反演。电磁法方面,加拿大 Quantec 公司生产的 Titan 24 多道电磁探测系统由于具备多道同时采集及多参数等特点,使得野外数据采集的效率和数据解释可靠性提高了不少。此外,国内外运用较多的电磁法仪器有美国 Zonge 公司的 GDP-32II 多功能电法工作站;EMI 与 IMAGEM 公司联合生产的 EH4 连续电导率成像仪;加拿大凤凰公司主要产品 V5-2000 型阵列式大地电磁系统及 V8-2000 多功能电法工作站;德国 Metrinix 公司推出的 GMS-07e 综合电磁法观测系统等,满足了目前深部矿产勘查中的硬件要求。在测量方法上,MT/AMT、CSAMT、TDIP、SIP(CR)、TEM 等各种方法都有突出的一面,丰富了地球物理人员在深部矿产开发中的方法选择。与方法理论和仪器系统取得的进步一样,电磁数据处理与反演理论也在不断地发展,常用的电磁法反演软件有 Winglink@、EMIGMA@等,电磁法二维反演技术已成熟,现正向三维发展。

近些年来,地球物理勘查方法在国内外深部找矿中应用中取得了一系列成果。电磁法具有不受高阻体屏蔽,对低阻体反映灵敏以及穿透深度大等优点,在

国内外深部找矿应用广泛,并取得了很好的效果。在国外,电磁法在加拿大萨德伯里(Sudbury)盆地铜、镍矿床<sup>[16]</sup>、美国内华达州金矿区<sup>[17]</sup>、墨西哥圣尼古(San Nicolas)拉硫化矿床<sup>[18]</sup>、俄罗斯 Malaya Botuobiya 及 ZimniiBereg 金伯利岩矿区<sup>[19]</sup>、澳大利亚奥林匹克(Olympic dam)铜-铀-金-矿区<sup>[20]</sup>等矿区的应用取得了很大的成果。在国内,王大勇等<sup>[21]</sup>利用 CSAMT 和 TEM 查明了铜陵龙虎山地区的侵入岩体和岩浆热液的运移通道,为该地区寻找隐伏矿床提供了有效的勘探手段。于泽新等<sup>[22]</sup>利用 CSAMT 在辽宁康杖子区外围取得了找矿新突破。李宁生等<sup>[23]</sup>利用大功率激电在宁夏中卫市某矿区取得了较好的效果。随着科技技术的发展,电磁法技术取得了很大地进步,据不完全统计其种类有 20 多种<sup>[24,25]</sup>,由于每种方法的优缺点不同,因此,通过合理的利用多种电磁法勘查技术进行综合研究是目前在深部找矿中很常见的一种技术手段,并在实际应用中取得了很好的效果。重磁法勘探技术在我国起步较早,由于其横向分辨率高等优点在我国矿产资源勘察中应用广泛,并取得了丰硕的成果。然而受当时技术水平的限制,重磁勘探工作只限于地表范围,在深部找矿应用较少。如今重磁 3D 物性反演成像技术和重磁多尺度边缘检测<sup>[26~33]</sup>等技术可以通过对重磁数据的网格化获取地下位场场源参数的分布情况,对矿集区地下深部结构和动力学过程的研究,以及其对成矿系统的形成、演化的制约;有利于探测、追踪矿集区主要含矿地层的空间分布,及与成矿相关岩体的规模大小、地下空间分布状态及其埋藏深度,勾勒出了矿集区地下三维结构。严加永<sup>[34]</sup>等人采用重磁多尺度边缘检测技术对长江中下游成矿带区域重力和航磁数据进行了边缘检测,获取了长江中下游地区构造框架;并结合铜陵地区航磁反演结果,在铜陵矿集区圈出了 6 个深部找矿靶区。邓震<sup>[35]</sup>等利用重磁多尺度边缘检测法给出了九瑞矿集区的地下地层的分布特征、控矿结构的展布规律、与成矿相关岩体的三维形态以及已知矿点的空间分布特征。近年来,地震勘探技术在国内外探测控矿构造及直接发现深部矿体方面的应用实例,说明了金属矿地震勘探相对于其他方法在深部找矿中拥有独特的优势<sup>[36~40]</sup>,并在岩(矿)石物性、反射数据处理和散射波研究方面取得了较大的进步,但总的来说,金属矿地震勘探技术在国内深部找矿找工作还处在试验阶段。

随着找矿目标体的埋藏深度不断地增加,地下地质环境、构造的复杂性以及地球物理方法反演的多解性,单一地采用某种地球物理方法已不能很好地适应地质工作对勘探精度的要求。地球物理勘查技术发展的重要方向,就是在先进的地质理论指导下开展综合地球物理研究。只有这样才能充分发挥各种地球物理方法的优势和特长,高效率、高效益地解决各种地质勘查任务。

### 1.3 九瑞矿集区矿产勘查现状以及存在的问题

九瑞矿集区的地质工作开始于 20 世纪 30 年代,50 年代末开展铜矿地质工作,迄今为止,多家地质单位、学校以及科研机构在此区域开展了区域地质调查、

矿产地质调查、物化探以及遥感等研究工作,取得了丰硕的成果。如在該区域已全面完成了 1:20 万、1:5 万区域地质矿产调查; 1:20 万区域重力测量、1:100 万航空物探测量和 1:5 万航磁测量以及部分区域 1:5 万重力、地面磁法测量;同时也全面完成了 1:20 万土壤地球化学和重砂测量、1:20 万水系沉积物测量,局部地段开展了 1:5 万或 1:2.5 万土壤地球化学测量以及 1:5 万水系沉积物测量;此外,該区域完成了 1:50 万卫星相片地质构造解译图,并开展了局部大比例尺 TM 和 MSS 航卫片解译。同时,对該区域内以及周边已知矿床、矿点、矿化点和异常点都不同程度地进行大比例尺地质、物化探工作。根据以上該区域的研究成果显示: 1) 本区勘查研究程度高,地质及物化探资料丰富; 2) 区内已知有丰山洞(邻区)、鸡笼山(邻区)、邓家山、东雷湾、武山、丁家山、洋鸡山和城门山等铜金矿床 8 处,矿点及矿化点十多处,为在已知矿区及其外围找矿提供了有利的条件; 3) 据以往预测研究将武山、邓家山矿田列为重要的预测靶区,预测铜资源量近 445 万吨,储量十分可观,表明在該区域找矿尚有较大的潜力; 4) 該区域以往发现和勘查的矿床大部分属于露头矿,而矿床形成深度又具不等性,据此推理在本区域应存在隐伏矿床。近两年来,邓家山地区在原有的勘查基础上又开展了面积性的综合调查工作,包括 1:1 万矿产地质草测、1:1 万土壤测量、1:1 万高精度磁法测量及 1:1 万可控源音频大电磁测深剖面测量等工作,并进行了钻探和测井工作;同时对岩芯进行取样分析,为在該区域寻找深部矿、隐伏矿工作提供了更丰富的资料支撑。

邓家山矿田(包括邓家山、东雷湾矿区)是九瑞矿集区重要的预测靶区之一,目前該区域已发现的矿床为一小型铜金多金属矿床,近年来通过对該区域的矿床地质条件、矿床地质特征、矿床成因、矿石成份以及物化探资料等都作了系统研究后,推测出該区域具有寻找大型矿床的潜力。迄今为止,邓家山矿田的深部找矿工作基本上没有开展,矿区内已发现的矿床大部分为露头矿,此外,前人在該区域开展了大量的物化探工作,工作、定位精度较低,探测深度较浅,受当时资料处理水平的限制,很多有用的信息无法有效的提取出来,制约了对地质问题的认识,难以满足寻找深部矿、隐伏矿的要求。目前,对九瑞矿集区的形成、演化动力机制也没有统一且被信服的结论<sup>[4]</sup>,地球物理方法在探测结果以及寻找地质指示特征遇到了很大的困难,严重影响了深部找矿的进展。其次,区域内矿山、采石场、公路以及高压电线所带来的干扰严重地影响了地球物理有效信息的采集,给资料处理解释的可靠性、准确性带来了很大的麻烦。此外,深部的容矿空间与地层和构造之间的关系以及在成矿过程中的起到的作用还有待进一步研究。因此,地球物理方法在深部地质矿产勘查中还面临着众多问题,这需要我们在这一方面加大工作力度去解决。

## 1.4 本论文结构与安排

本文是以国家科技支撑项目“江西九瑞矿集区控矿地层和岩体三维探测与找矿预测研究”课题为依托，选择九瑞矿集区邓家山矿田进行综合地球物理方法应用研究，对应用在深部找矿的各种地球物理方法的特点进行分析，总结出一套合适的方法组合，查明矿区内地下矿化异常体的空间展布，圈定找矿靶区，为该矿区深部成矿预测提供重要的地球物理依据。

论文结构编排如下：

1) 第一章 绪论。叙述了国内外深部地球物理方法的研究现状和发展趋势及综合地球物理方法在深部找矿中所取得的成果，并指出了邓家山矿田矿产勘查的现状以及存在的问题，简述了论文的结构和安排。

2) 第二章 区域地质背景及地球物理特征。首先，大致对九瑞矿集区的地质背景特征进行了概括；其次，总结分析了邓家山矿田的地层，构造，岩浆岩及围岩蚀变基本情况，在此基础上归纳了矿区的成矿规律及成矿类型。最后，对矿区的地层和岩（矿）石物性进行整理分析，大致描述了矿区地层岩（矿）石的地球物理特征。

3) 第三章 重磁数据处理及解译。首先对邓家山矿田的重磁数据进行了整理，通过对重力数据进行延拓处理后，大致描述了矿区的重力场特征，对磁法数据进行了化极、滤波、延拓等处理，描述了矿区的磁场特征，之后对重磁数据进行欧拉三维反褶积反演，并结合地质资料，推断了矿区存在的构造断裂位置及走向。

4) 第四章 电磁法数据处理及解译。介绍了 CSAMT、AMT 和 TDIP 方法的原理以及非线性共轭梯度反演算法的理论。对 CSAMT、AMT 数据进行了非线性共轭梯度（NLCCG）反演及 TDIP 数据反演后，对比结果分析了 CSAMT、AMT 及 TDIP 方法在矿区的适用性情况，并结合地质资料解释了矿区褶皱及断层特征，岩浆通道位置，预测了成矿有利区域的位置。

5) 第五章 结论与建议。对论文主要的研究内容及成果进行了总结，并提出了存在的问题及改进的方法。



## 2 区域地质背景及矿床地质特征

### 2.1 区域地质背景

#### 2.1.1 区域地层

九瑞矿集区位于扬子准地台中部，下扬子带台褶西段、北临大别山隆起，南靠江南褶皱造山带，是长江中下游成矿带重要的铁铜金多金属成矿带的重要组成部分<sup>[42~44]</sup>。

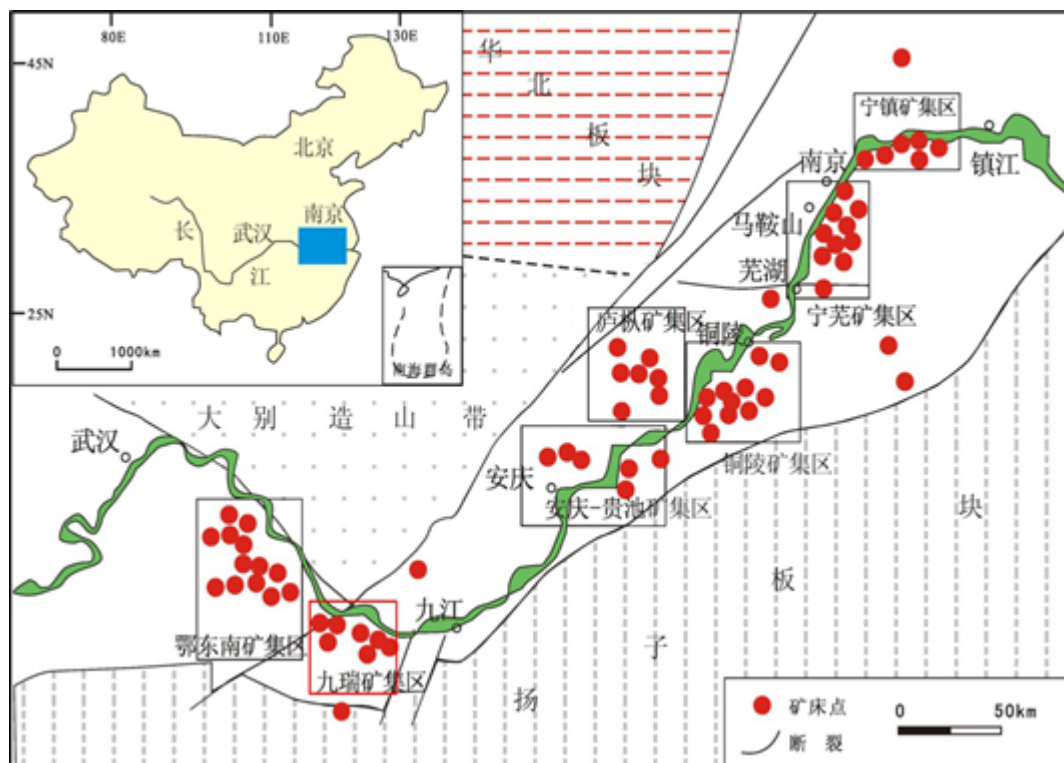


图 2.1 长江中下游成矿带矿集区分布简图（据翟裕生等，1992 改绘）

Figure 2.1 Schematic diagram showing distribution of ore concentration area in the Middle and Lower of Yangtze River (after Zhai et al, 1992)

九瑞矿集区的基底地层为中元古界双桥山群，盖层从震旦系至第四系，除了部分地层（侏罗系、白垩系等）缺失外，大部分均有出露，厚度达到近万米。其中奥陶系、志留系组成背斜构造的核部，泥盆系、二叠系分布在背向斜的翼部，三叠系地层通常组成向斜构造的核部，第三系在断陷盆地中呈零星分布，第四系则主要分布在在长江南岸及河流、湖泊分布区<sup>[44]</sup>。区内地层对成矿的控制，主要表现在作为岩浆岩的围岩条件及形成各类矿体，另外，某些岩性、岩相与特定矿床（体）形成密切相关，严格地局限在某一特定时代地层中。九瑞矿集区 23 个铜、金产地统计结果显示，90%左右的铜、金矿体的分布受地层控制。其中，

主要赋矿层层为石炭系黄龙组-五通组，次要赋矿层为二叠系。其他赋矿层有三叠系、志留系、奥陶系，但均为小矿体。

### 2.1.2 区域构造

九瑞矿集区内经历了多次构造活动，其中，晋宁运动、印支运动和燕山运动构造最为强烈，分别形成了区内基底构造和盖层构造<sup>[43]</sup>。晋宁运动使元古界双桥山群褶皱隆起，在九岭一带形成轴向褶皱基底，伴随这一褶皱，形成了由北东向、北西西向基底深断裂以及南隆北拗的基底菱形网格构造，成为本区内重要的导岩导矿构造。在印支运动时期，区内震旦系-三叠系形成了近东西向的褶皱构造，由南向北有：新塘向斜、长山-城门湖背斜、乌石街-赛湖向斜、大冲-丁家山背斜、横立山-黄桥向斜、界首-大桥背斜、邓家山-通江岭向斜。在褶皱发生的同时，区内形成了一系列北东东向纵张断裂和北西向横张断裂相配套的盖层菱形网格构造，其节点则是区内主要的运岩、运矿构造。据大量资料显示，区内岩浆活动与成矿活动与地质构造的发生、发展和演化过程密切相关。岩浆岩的成矿作用以及岩浆岩的空间展布与矿床的分布受多期、多阶段、多层次及在空间的延续性的构造活动控制影响。

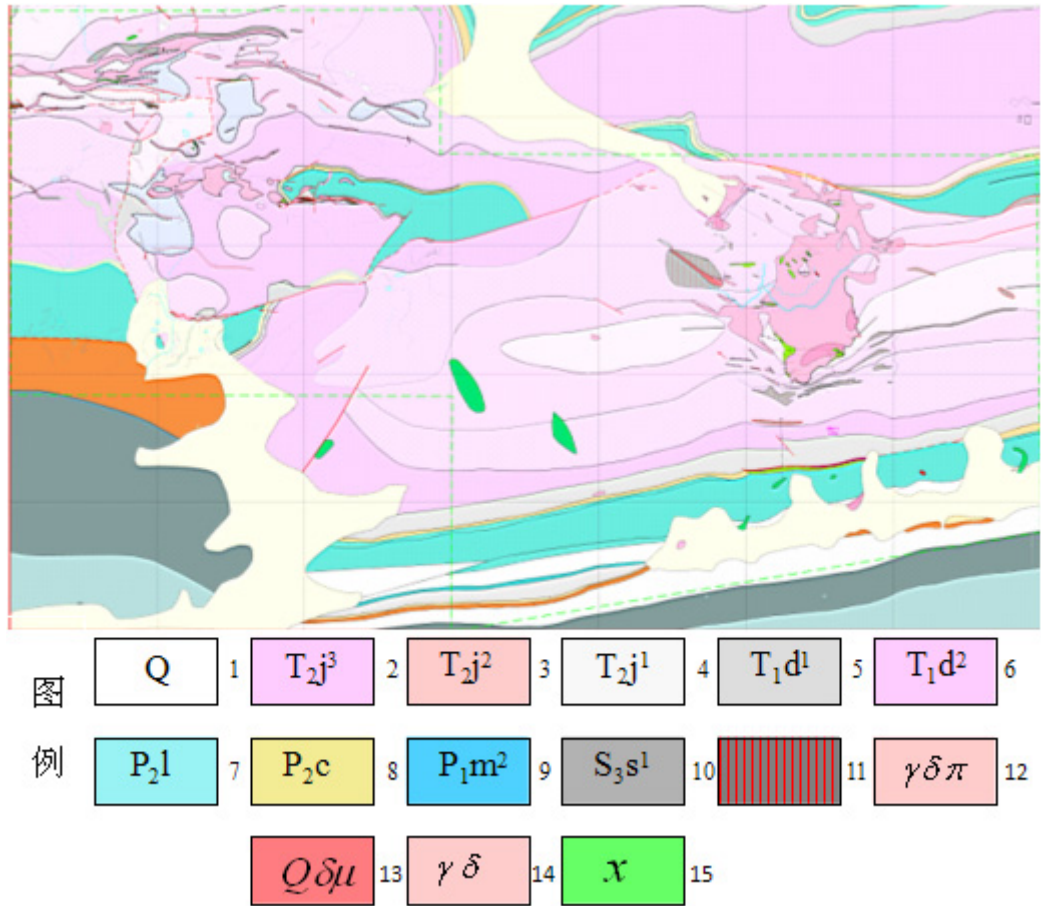
### 2.1.3 区域岩浆岩

九瑞矿集区内岩浆岩活动频繁，主要在晋宁、加里东、燕山和喜山等四期活动，岩浆岩种类较多，其中以燕山期的岩浆岩侵入最为强烈，并与内生金属矿床密切相关。区内主要有城门山、武山、东雷湾和丰山洞等 20 多个岩体，但多为小岩体，其中，城门山、武山、东雷湾三个岩体呈岩株产出，其它则呈岩墙或岩脉。岩体受长江深断裂带构造的影响，大部分呈北东东向带状分布在长江南侧，复式岩体多分布在奥陶系中统至三叠系中统地层中。区内岩石主要类型为花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩、闪长岩、石英斑岩等。

## 2.2 矿床地质特征

邓家山矿田是九瑞矿集区重点靶区之一，主要包括邓家山、东雷湾矿区。矿区位于九瑞矿集区西北部，城门山-丰山洞聚岩聚矿构造北端，西部紧邻丰山洞、鸡笼山大型铜多金属矿床，南东与武山铜矿相邻。矿区内地层志留系-三叠系主要受印支时期扬子陆块与华北、华南陆块碰撞拼接的过程中的南北向挤压应力场的作用和华南陆块向北运移的影响形成的近东西向的褶皱和断层，以及印支-燕山幕阜-九岭造山带北坡由南向北滑移作用造成的南北挤压所形成的北东东向

平移-逆冲断层以及受局部应力作用形成的近南北向的逆冲断层和小规模褶皱，并受燕山期岩浆岩侵入作用的影响产生小规模的顺层断层和平移断层。该区受多期构造运动的影响，其构造类型较简单，但空间形态和内部构造较复杂。详见图 2.2。



1-第四系；2-三叠系中统嘉陵江组上段灰岩；3-三叠系中统嘉陵江组中段角砾状白云质灰质；4-三叠系中统嘉陵江组下段厚层灰岩；5-三叠系下统大冶组下段黄色页岩夹薄层灰岩；6-三叠系下统大冶组上段薄层灰岩；7-二叠系上统龙潭组煤系；8-二叠系上统长兴组灰岩；9-二叠系下统茅口组下段炭质页岩夹灰岩；10-志留系上统纱帽组下段砂岩；11-构造破碎带；12-花岗闪长斑岩；13-石英闪长斑岩；14-花岗闪长岩；15-煌斑岩

图 2.2 九瑞邓家山矿田地质图（据赣西北大队）

Figure 2.2 The geolog map of the Dengjiashan ore district in the JiuRui



2.2.1 地层矿区内出露地层由老到新有志留系中统纱帽组，二叠系下统茅口组、上统龙潭组和长兴组，三叠系下统大冶组、中统嘉陵江组及第四系。受构造和岩浆作用影响，地层产状复杂，总体走向近东西向，部分地层发生倒转。根据研究区钻孔和地质资料对地层进行整理和分析，得到了邓家山矿田的主要地层简表如表 2.1 所示。

表 2.1 邓家山矿田地层简表  
Table 2.1 The table of stratas of the Dengjiashan ore district

界	地层		主要岩性	厚度
新生代	Q	第四系	碎石亚粘土	0~20.35m
中生代	T <sub>2j</sub>	三叠系中统嘉陵江组	灰岩、角砾状灰质白云岩	>746m
	T <sub>1d</sub>	三叠系下统大冶组	灰岩、黄绿色页岩	173.4m
	P <sub>2c</sub>	二叠系上统长兴组	硅质页岩夹炭质页岩、灰岩	0~10m
古生代	P <sub>2l</sub>	二叠系上统龙潭组	灰色页岩炭质页岩夹煤层	25m
	P <sub>1m</sub>	二叠系下统茅口组	结核灰岩	>340m
	S <sub>3s</sub>	志留系上统纱帽组	细砂岩、粉砂岩、泥质粉岩	

1) 志留系：上统纱帽组 (S<sub>3s</sub>) 分布于矿段西南 F<sub>12</sub> 以南斜纲山一带，由细砂岩、粉砂岩、泥质粉岩组成。

2) 二叠系主要分布于易家山-铜鼓脑、药丛凹以及堡下-黄柏岩一带。下统茅口组 (P<sub>1m</sub>) 薄、中厚层含燧石结核灰岩，厚度大于 350m，是矿区铜钼矿控矿围岩。上统龙潭组 (P<sub>2l</sub>)：灰色页岩及炭质页岩夹煤层，厚 0~10m。上统长兴组：上部为 1.5m 左右硅质页岩夹炭质页岩，下部为中厚层灰岩夹燧石条带，厚 25m 左右。

3) 三叠系广泛分布于矿段大部分地区。下统大冶组 (T<sub>1d</sub>)：分布于矿段中部。下段(T<sub>1d</sub><sup>1</sup>)为黄绿色页岩，局部夹灰岩透镜体，厚 11.4m；上段 (T<sub>1d</sub><sup>2</sup>) 为中厚层及薄层灰岩，下部夹泥质条带，底部夹页岩，厚 162m。中统嘉陵江组 (T<sub>2j</sub>) 分布于矿段北部，东南部及龙垱沟；下段(T<sub>2j</sub><sup>1</sup>)为薄-厚层灰岩、白云质灰岩、鲕状灰岩，厚 246m；中段 (T<sub>2j</sub><sup>2</sup>) 为薄-极薄层白云质灰岩、角砾状白云质灰岩、泥质白云质灰岩，厚 183m；上段 (T<sub>2j</sub><sup>3</sup>) 为厚层白云质灰岩、灰岩、生物碎屑灰岩，厚度大于 317m。

4) 第四系(Q) 分布于沟谷及溶蚀洼地中, 为碎石亚粘土、粘土等。厚度为 0~20.35m。

## 2.2.2 构造

邓家山矿田由北往南存在三个东西向构造系统, 柯家塘-陈家湾以北弱变形原地系统、竹林塘-堡下逆冲挤压变形系统、斜纲山-凉亭脑斜冲叠覆岩片, 三者构成滑覆构造前缘推覆构造体系。中部挤压变形系统又以  $F_5$  为界分东部邓家山挤压变形区和西部竹林塘挤压变形区, 前者包括邓家山、堡下、龙坞沟, 是与隐伏岩体有关的铜金成矿系统, 东西向褶皱断裂控矿是该区最大特点, 龙坞沟矿段即位于该区。

### 1) 褶皱

龙坞沟矿段位于邓家山-通江岭向斜之西端, 由一个次级背斜和一个次级向斜组成, 呈近东西向平行排列。自北向南分述如下:

堡下-黄柏岩倒转背斜: 西起邓家山村, 向东经堡下、黄柏岩出土。核部由二叠系下统茅口组( $P_{1m}$ )含燧石结核灰岩组成。两翼分别为  $P_{2l}$ 、 $P_{2c}$ 、 $T_{1d}^1$ 、 $T_{1d}^2$  等。北翼倒转, 产状南倾, 倾角  $50^\circ$  左右; 南翼正常, 但近核部受  $F_{10}$  破坏, 地层不连续, 堡下以西背斜倾伏端地层产状正常, 倾角平缓。沿背斜轴部及  $F_{10}$  断层附近有岩体侵入, 并伴有 Au、Cu、Pb、Zn、Sb 等矿化。该背斜亦为矿区重要控矿背斜。

药丛凹背斜: 轴部地层为茅口组( $P_{1m}$ )灰岩, 受  $F_9$  破坏后出露不完整。背斜轴向呈北东向。

### 2) 断层

矿区断层发育, 以东西向为主, 多为层滑逆断层, 一般为成矿前之构造, 并具多期活动特点, 是区内主要控岩控矿构造; 南北向断裂一般生成较晚, 切割东西向断层; 此外, 还有规模较小的北西向和北东向平移断层。现将主要断层特征叙述如下:

$F_1$ : 分布于竹林塘到落鹰嘴, 发育于嘉陵江组中段和上段间。长度大于 1000m (西端汇入丰山洞震碎角砾岩中), 宽 0.5~30m。呈东西走向, 向南倾, 倾角  $50\sim60^\circ$ 。属逆断层。断层活动频繁, 先压后张, 并有岩浆沿其侵入, 构造角砾岩发育, 并伴有蚀变和矿化。竹林塘金矿和落鹰嘴南金矿受其控制。

$F_{10}$ : 分布于堡下-黄柏岩背斜南翼。长大于 1500m, 宽 2~30m。呈东西走向, 向南倾, 倾角上陡( $60^\circ$ )、下缓( $30^\circ$ )。属剪切带型逆断层。断层角砾岩发育, 构造透镜体发育, 沿断层有大量花岗闪长斑岩侵入。断层带常发生硅化, 局部糜棱岩化, 褐铁矿化、黄铁矿化、辉锑矿化及铅锌金矿化普遍。是堡下金矿重要控矿构造, 矿化沿断层面及次级裂隙贯入。

F<sub>13</sub>: 发育于大眼泉村北。长 400m, 宽 10~20m, 两端被 F<sub>9</sub> 和 F<sub>5</sub> 切割。呈北西西向展布, 向北北东倾, 倾角地表缓(30°)深部陡(70°)。属正断层。断层角砾岩发育, 大理岩化强, 并见有花岗闪长斑岩沿其贯入。是龙坞沟矿段深部隐伏岩矿体主要控岩控矿构造。

F<sub>5</sub>: 为区域北西向断裂一部分。分布于矿区大眼泉-落鹰嘴, 北部弥失。长大于 2000m, 宽 1~20m, 呈南北走向, 总体向西倾, 倾角 20~80°。断层面弯曲呈弧形。属平推逆断层。沿断层广泛发育构造角砾岩, 局部见矿化角砾, 地层错位显著, 并切割早期近东西向断裂, 属成矿后断层。

### 3) 破碎带

矿段破碎带发育, 主要有隐爆角砾岩筒、震碎角砾岩带、构造角砾岩带、塌陷角砾岩等。

隐爆角砾岩: 见于竹林塘, 受 F<sub>1</sub> 断裂控制, 呈园筒状。角砾岩发育, 角砾为浅色花岗闪长斑岩和灰岩, 胶结物为深色矿化花岗闪长斑岩。从南到北分带明显, 分别为灰岩→发育方解石脉碎裂灰岩→以灰岩角砾为主隐爆角砾岩→以浅色花岗闪长斑岩为主隐爆角砾岩

震碎角砾岩: 分布于竹林塘以西, 属丰山洞岩体外接触带。形态不规则, 主体围绕丰山洞岩体。角砾成分复杂(灰岩、火成岩等), 胶结物为岩浆岩成分。角砾岩硅化、大理岩化强烈并伴有 Cu、S、Fe 矿化。

构造角砾岩: 沿 F<sub>1</sub> 产出角砾岩带, 伴随断层出现, 形态有长条状、透镜状、不规则状, 沿 F<sub>13</sub> 则产出角砾岩带, 药丛凹、堡下分别沿 F<sub>9</sub>、F<sub>10</sub> 产出角砾岩带等; 角砾成分则依据断层产出部位地质体的成分而变化。

塌陷角砾岩: 为灰岩溶蚀洼地岩石崩落堆积而成。主要有铜鼓脑北西角砾岩带、大眼泉村北和堡下东南角砾岩带, 前者规模最大。

## 2.2.3 岩浆岩

邓家山矿田内岩浆岩活动较强烈, 主要为燕山早期的花岗闪长斑岩, 花岗闪长岩、石英闪长岩, 此外尚有零星分布的燕山晚期的煌斑岩和辉绿岩脉。较大的有龙坞沟隐伏岩体, 邓家山岩体、黄家塘岩体及竹林塘岩枝等。岩体多呈岩墙、岩枝和岩脉产出, 出露总面积 0.5km<sup>2</sup>。岩体多沿东西向断裂带侵入, 岩体剥蚀程度一般较浅。

龙坞沟隐伏岩体: 出现在龙坞沟矿段深部-340m~-420m 标高以下。呈岩墙产出, 目前控制岩体顶面平缓, 向 SW 方向缓倾。岩体与围岩接触带常有 0~20m 矿化矽卡岩。岩石主要为花岗闪长斑岩, 多具矽卡岩化和钾化等。岩体南部为 F<sub>13</sub> 切割, 北界未控制, 该岩体是本区铜钼矿重要成矿岩体。

黄家塘岩体: 分布于柯家塘-黄家塘-珠树泉一带, 长约 2200m, 宽一般为 50~80m, 最宽约 200m。呈 NEE 向不规则长条状分布, 岩体沿黄家塘背斜轴部

层间滑动面侵入。岩体大致为 NNW 向倾斜，西部则向南倾，倾角近地表较缓（30~40°），深部变陡（54~85°）。岩体中常见长条状 T<sub>2j</sub><sup>2</sup> 灰岩捕虏体。岩性以花岗闪长斑岩为主。

邓家山岩体：分布于邓家山村-堡下一带，长 1500m，宽几米。岩体呈 EW 向沿堡下一黄柏岩背斜轴部和倾伏端以及 F<sub>10</sub> 侵入。岩体向南倾，倾角地表陡，深部稍缓。岩性以花岗闪长斑岩为主。岩体西端接触带附近常具大理岩化和符山石矽卡岩化，后者为该区浅部铜矿载体；岩体东部与 F<sub>10</sub> 共同作用形成堡下金矿床。

竹林塘岩枝：分布于上、下竹林塘一带，沿 F<sub>1</sub> 侵入，长 800m，宽 40m，向南倾，倾角 45° 左右，向东分为两枝。岩性为花岗闪长斑岩。在下竹林塘处见有深灰色矿化花岗闪长斑岩，后者沿前者收缩裂隙贯入，并伴随隐爆作用，使该处岩体及接触带呈角砾状，浅色花岗闪长斑岩构成大小不等的角砾，为深色花岗闪长斑岩胶结，并伴有蚀变和金、硫化物矿化，是竹林塘金矿赋矿母岩。

煌斑岩零星分布于下竹林塘、黄家塘、落鹰嘴东、邓家山一带；辉绿岩见于黄柏岩北及大林下一带，呈脉状，规模较小。

## 2.2.4 围岩蚀变

矿区内蚀变类型主要有：大理岩化、硅化、矽卡岩化、钾长石化以及滑石化、绿泥石化、绢云母化等。

大理岩化在矿区分布广泛，地表在龙坞沟、邓家山北坡、落鹰嘴及竹林塘以西一带均可见到，深部沿岩体接触带附近围岩中广泛发育。

硅化：主要分布于黄家塘岩体外接触带和悬浮体中以及堡下 F<sub>10</sub> 破碎带中，另在龙坞沟深部岩体中也见有硅化现象。

矽卡岩化：见于龙坞沟矿段深部岩体接触带中，有透辉石石榴子石矽卡岩和符山石矽卡岩。组成矿物有：透辉石、透闪石、石榴子石、符山石、方柱石、阳起石、绿帘石、方解石等。

钾长石化：见于龙坞沟深部岩体中，多呈钾长石细脉和钾长石-石英细脉状产出。

蚀变分带在地表不明显，但在龙坞沟矿段深部具明显分带现象，从上到下可分为四个带：①灰岩带，该带岩石未发生蚀变或偶见微弱大理岩化，常见于二叠系长兴组-三叠系嘉陵江组地层中；②大理岩化带，在二叠系茅口组地层中分布较多，受岩体和沿层间裂隙充填的小岩脉影响，围岩发生大理岩化，蚀变强度不一，大理岩化灰岩-大理岩均可见；③矽卡岩化带，见于岩体内外接触带，有矽卡岩、矽卡岩化大理岩、矽卡岩化花岗闪长斑岩、硅化灰岩、大理岩等，蚀变不均匀；④钾长石化-硅化带，发育于岩体内部。其中，第②、③带是本区重要铜钼矿化蚀变带。

## 2.3 矿区成矿类型和成矿规律

矿区矿床的成因及分布规律与地下深部的地质环境、结构和构造、物质成分及岩浆岩活动是密切相关的。为了对矿区的成矿类型和成矿规律进行剖析,必须得对地下构造特征有相当清晰的认识。九瑞矿集区经历了多期构造活动,主要是晋宁、印支及燕山运动构造活动,其中,燕山运动的变形直接作用在印支褶皱带上,使得矿集区内构造复杂、断裂丰富及岩浆活动强烈,从而形成了富集成矿的有利区域。邓家山矿田成矿时间主要是在燕山期不同阶段的构造活动和岩浆岩演化过程中,从早到晚,控矿岩体与矿种相对应的关系为:闪长岩或石英闪长(玢)岩与 Au (Cu、Pb、Zn、Ag) 有关;花岗闪长斑岩与 Cu、Au (Mo、Pb、Zn、Ag) 密切;石英斑岩则与 Mo (Cu) 相关。其中,花岗闪长斑岩在矿区内的成矿作用占主导地位,矿(化)体则赋存在花岗闪长斑岩的接触带附近,主要以铜金矿为主。矿区内岩石的建造对赋矿裂隙的产生以及岩浆的渗透、运移、屏蔽和沉积的控制明显。此外,还影响成矿的方式和矿床的类型。岩性对形成的矿床类型具有很大的影响,矽卡岩型铜矿的形成则与围岩是碳酸型盐岩性密切相关。在成矿物质来源丰富的情况下,构造活动对岩石及矿床的形成起着十分重要的作用,矿区内东西向紧闭褶皱断裂是控制着成矿岩带的分布,此外,岩体与围岩接触界面、断层破碎带、构造裂隙带以及碎屑岩与碳酸盐岩的岩性差异面是控制矿体的容矿构造,控制着不同类型的矿床生成。

## 2.4 矿区地层及岩(矿)石物性特征

岩石的物理性质及空间变化是形成地球物理场的基础,为了更好地研究地球物理场的响应特征,对矿区的岩石及岩芯进行了物性(密度、磁化率和电阻率)测量和统计分析。详见表 2.2~2.7。

### 1) 密度特征

综合所收集的资料,对矿区地层及岩(矿)石的密度进行统计,得到了各岩层的密度的均值。如表 2.2~2.3。

如表 2.2 所示,矿区内地层密度差异明显,密度差达到  $0.05\text{g/cm}^3$  以上的密度界面有 4 个,由于二叠系上统地层厚度较小,虽与下统形成了较大的密度差异,但识别起来很困难。因此,在实际情况中大致将矿区分分为 3 个密度层(中三叠统-下三叠统、上二叠统-下二叠统、上志留统)。其中,中三叠统-下三叠统为高密度层,密度变化范围在  $(2.71\sim 2.73)\text{g/cm}^3$  整个高密度层的密度均值为  $2.7\text{g/cm}^3$  左右;上二叠统-下二叠统为高密度层,除了二叠系上统龙潭组密度较低外,整个密度层密度均值在  $2.65\text{g/cm}^3$  左右。上志留统为中高密度层,其密度值均值为  $2.62\text{g/cm}^3$ 。如表 2.3 所示,整个矿区内岩浆岩密度差异较大。其中,密度值最高的是辉绿玢岩,其密度均值为  $2.91\text{g/cm}^3$ ;石英闪长玢岩密度值以  $2.89\text{g/cm}^3$  次之。

由此可以看出此矿区内地层岩石的密度明显小于两种岩浆岩的密度。而其它岩浆岩除了闪长岩(密度值均值在  $2.7 \text{ g/cm}^3$ )外, 均表现为低密度岩体, 其密度值均值在  $2.56 \text{ g/cm}^3$ 。矿区内主要矿石中以含铜黄铁矿的密度最高, 其密度均值达到  $4.17 \text{ g/cm}^3$ ; 而含铜矽卡岩次之, 其密度均值为  $3.81 \text{ g/cm}^3$ 。

通过对比矿区岩矿体与各地层沉积岩的密度值发现: 矿区内岩浆岩虽与大部分各地层沉积岩存在密度差, 但由于该区岩浆岩侵入受多期构造的影响, 其形态和侵入地层层位较复杂, 因此, 单依靠重力 3D 反演不能很好地描述地下岩体的形态, 这需要在数据处理过程中结合精细的 2D 剖面反演技术来达到好的效果; 含矿岩体及矿体与各地层沉积岩的密度差异明显, 在其埋深及规模大小适合的情况下, 重力技术在区分岩矿体和围岩拥有较大的优势。

表 2.2 邓家山矿田地层密度统计表

Table 2.2 The statistical chart of stratum density of the Dengjiashan ore district

地层年代		岩性	块数	常 见 值 ( $\text{g/cm}^3$ )	平均值 ( $\text{g/cm}^3$ )
三叠系中统嘉陵江组	T <sub>2j</sub>	灰岩、灰质白云岩	173	2.66-2.83	2.73
三叠系下统大冶组	T <sub>1d</sub>	灰岩、黄绿色页岩	188	2.70-2.72	2.71
二叠系上统长兴组	P <sub>2c</sub>	页岩、结核灰岩	14	2.39-2.75	2.62
二叠系上统龙潭组	P <sub>2l</sub>	炭质页岩	5	2.51-2.62	2.57
二叠系下统茅口组	P <sub>1m</sub>	灰岩、炭质页岩	250	2.59-2.71	2.69
志留系上统纱帽组	S <sub>3s</sub>	砂岩、泥岩	7	2.65-2.67	2.62

表 2.3 邓家山矿田岩(矿)石密度统计表

Table 2.3 The statistical chart of ore density of the Dengjiashan ore area

岩性		块数	常见值( $\text{g/cm}^3$ )	平均值( $\text{g/cm}^3$ )
$\gamma\delta\pi$	花岗闪长斑岩	248	2.22-2.99	2.52
$\lambda\delta\mu$	石英闪长玢岩	167	2.42-3.37	2.89
Lmp	煌斑岩	54	2.36-2.47	2.59
$\gamma\delta$	花岗闪长岩	20	2.39-2.87	2.57
$\beta\mu$	辉绿玢岩	7	2.83-2.99	2.91
$\delta$	闪长岩	31	2.42-2.67	2.7
CuPy	含铜黄铁矿	171	2.50-5.50	4.17
CuSk	含铜矽卡岩	10	3.30-4.50	3.81

## 2) 磁性特征

依据矿区内各地层总磁化强度分析(见表 2.4)。矿区内地层从三叠系到志留系, 各地层沉积层岩石的磁化强度有一定的差异。由此可将矿区内地层分为 3

个磁性层：中三叠系统-下三叠统为第一磁性层，磁化强度在(18~30)nT；上二叠统-下二叠统为第二磁性层，磁化强度在(8.5~11)nT；第三磁性层为志留系上统纱帽组，磁化强度在 55nT 左右。综上所述，矿区内地层磁化强度整体偏低，因此，本区引起磁异常的主要是与侵入岩有关的地质构造活动引起的。

通过对比矿区内岩（矿）石的磁化率和剩余磁化强度（见表 2.5）可知，区内磁化率最高的是花岗闪长斑岩，常见值为  $175 \times 10^{-6} \text{SI}$ ，剩余磁化强度最高的是花岗闪长斑岩和煌斑岩，常见值为  $564 \times 10^{-3} \text{A/m}$ ；矿石中黄铜矿黄铁矿化外、化内矽卡岩磁化率在  $(49 \sim 50) \times 10^{-6} \text{SI}$  范围内变化，剩余磁化强度则在  $(18 \sim 20) \times 10^{-3} \text{A/m}$  幅度范围内变化。由于矿区内的矿化体的规模远小于岩体的规模，因此，区内的磁异常通常是含磁性岩体引起的。

表 2.4 邓家山矿田地层总磁化强度统计表

Table 2.4 The statistical chart of the total magnetic susceptibility of stratum of the Dengjiashan ore district

地层年代		岩性	块数	常见值 $J(J_i + M_r)$ (nT)
三叠系中统嘉陵江组	T <sub>2j</sub>	灰岩、灰质白云岩	173	18
三叠系下统大冶组	T <sub>1d</sub>	灰岩、黄绿色页岩	188	30
二叠系上统长兴组	P <sub>2c</sub>	页岩、结核灰岩	14	8.5
二叠系上统龙潭组	P <sub>2l</sub>	炭质页岩	5	8.5
二叠系下统茅口组	P <sub>1m</sub>	灰岩、炭质页岩	250	11
志留系上统纱帽组	S <sub>3s</sub>	砂岩、泥岩	7	55

表 2.5 邓家山矿田岩（矿）石磁化率和剩余磁化强度统计表

Table 2.5 The statistical chart of ore magnetic susceptibility and remanent magnetic susceptibility of the Dengjiashan ore area

岩性	块数	常见值 ( $\kappa \times 10^{-6} \text{SI}$ )	常见值 $J_r (\times 10^{-3} \text{A/m})$
花岗闪长斑岩	248	175.21	564
石英闪长玢岩	167	60.31	100
石英闪长岩	156	29	334
煌斑岩	16	23	564
黄铜矿黄铁矿化外矽卡岩	25	49.81	20.33
黄铜矿黄铁矿化内矽卡岩	31	89.35	17.87

### 3) 电性特征

通过分析表 2.6 可以看出，矿区内地层三叠系和二叠系的灰岩电阻率高，幅度范围在  $8000 \sim 14000 \Omega \cdot \text{m}$  之间，而志留系上统纱帽组地层相对于二叠系或三叠

系呈低阻特性，电阻率值在  $2000\Omega\cdot\text{m}$  左右。但在实际情况中，矿区内二叠系上统茅口组、龙潭组以及长兴组的灰岩含炭量高，其电阻率值很低，约为几十  $\Omega\cdot\text{m}$ 。此外，矿区内还有少量的第四系，主要呈低阻特性。通过总结分析，二叠系与三叠系以及志留系地层形成了较大的电性差异，矿区地层由老到新可分为四个电性层，即志留系上统纱帽组为第一电性层；二叠系茅口组、龙潭组及长兴组为第二电性层；三叠系嘉陵江组和大冶组为第三电性层；表层第四系为第四电性层。其中，二叠系与三叠系地层的接触带是矿区内矽卡岩型铜金矿的有利成矿带。另外，燕山期花岗闪长斑岩是本区内的成矿母岩，对成矿起着决定性作用，据表 2.7 可以看出，其电阻率值为  $636.6\Omega\cdot\text{m}$ ，明显呈低阻特性，与周围围岩有较大的电性差异。因此，综上所述，该地区的地层及岩（矿）石的电性特征为开展电法勘探提供了较好的电性条件。

表 2.6 邓家山矿田地层电性参数统计表

Table 2.6 The statistical chart of stratum electrical parameters of the Dengjiashan ore district

地层年代		岩性	块数	常见值 $\rho(\Omega\cdot\text{m})$
三叠系中统嘉陵江组	T <sub>2j</sub>	灰岩、灰质白云岩	173	11000
三叠系下统大冶组	T <sub>1d</sub>	灰岩、黄绿色页岩	188	14000
二叠系上统长兴组	P <sub>2c</sub>	页岩、结核灰岩	14	9000
二叠系上统龙潭组	P <sub>2l</sub>	炭质灰岩	5	9000
二叠系下统茅口组	P <sub>1m</sub>	灰岩、炭质灰岩	250	13500
志留系上统纱帽组	S <sub>3s</sub>	砂岩、泥岩	7	2700

表 2.7 邓家山矿田岩（矿）石电性参数统计表

Table 2.7 The statistical chart of ore electrical parameters of the Dengjiashan ore district

岩性		常见值 $\rho(\Omega\cdot\text{m})$
$\gamma\delta\pi$	花岗闪长斑岩	636.6
$\lambda\delta\mu$	石英闪长玢岩	417.5
$\Lambda\mu\pi$	煌斑岩	492.1
$\beta\mu$	辉绿玢岩	2000
CuSk	含铜矽卡岩矿体	458.5
CuPy	含铜黄铁矿	61.7





### 3 重磁数据处理与解译

#### 3.1 重力数据处理

##### 3.1.1 矿区重力场特征

为了解邓家山矿田的重力异常特征，本文收集了九瑞矿集区 1:5 万重力数据进行整理后，截取部分数据进行处理后，获得了邓家山矿田（图中黑框区域）布格重力异常特征（图 3.1）。

邓家山矿田重力异常特征（图 3.1 黑色方框）整体上由南到北呈由低到高分布，区有三处重力高值异常，且沿 ES 向呈倒“凸”字形分布，其中矿区中部区域重力高值异常将两处低值异常分隔开来，使得低值异常呈“凹”状分布，重力最高异常区值  $1.9 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，最低异常区值则为  $-0.8 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，两者相差了  $2.7 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，且高、低重力异常界限明显。异常特征基本上符合本区的构造轮廓，同时也反映了区内盖层与深部构造及岩浆岩的关系。区内高重力异常区表明该处底部有高密度体存在，根据地质资料，推测是由三叠系灰岩引起的；而区内右边低重力异常则可能是由花岗闪长斑岩引起，是该区成矿有利位置；左边的低重力异常则可能是大理岩及部分花岗闪长斑岩引起的，目前在該区域发现了小型的多金属矿床、矿点。

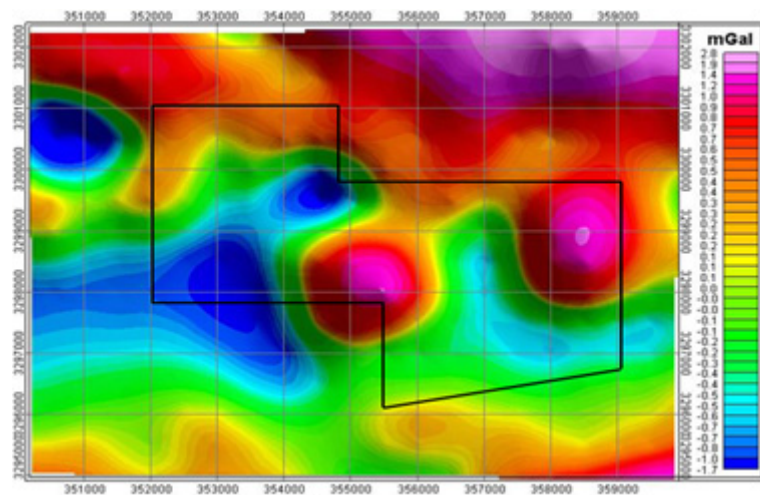


图 3.1 邓家山矿田原始布格重力异常分布图

Figure 3.1 The diagram of original Bouguer gravity anomaly in the Dengjiashan ore district

### 3.1.2 解析延拓法重力异常分离

野外实测重力异常通常是由地下目标产生的有用异常和其他各种因素引起的干扰异常组成的。当干扰强烈时，有效异常往往被歪曲或掩盖。因此，为了压制或降低干扰因素对有用异常带来的影响，提高解释的可靠性，在重力数据处理中对实测数据进行预处理，解析延拓就是其中的一种手段。解析延拓分为向上延拓和向下延拓，其目的是为了降低或者消除干扰，突出有效异常，提高成果解释的准确性。向上延拓是根据地面上的实测异常数据计算出在地面以上某一高度的异常值，其目的是为了压制浅部地质目标体（磁性体或密度不均匀体）的干扰，突出深部有效异常体。早在 1949 年，Peters 指出通过延拓可以对波长不同的信号进行加强或减弱，由此推导出的加权系数因不同高度而不相同<sup>[44]</sup>。由 Stokes 理论可知，在已知地面任何一点的重力值的情况下，那么任何一点高处的重力值可通过式更高一点的重力值能够通过式(3.1)计算得到。公式如下：

$$g(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i \frac{hA}{2\pi r_i^3} \quad (3.1)$$

式(3.1)中， $g(h)$ 为上延高度  $h$  时的重力值， $g_i(0)$ 是第  $i$  个高度为 0 时的重力异常值， $A$  为异常体的表面积， $r_i$ 是  $i$  点原位置与上延后位置之间的距离，如图 3.2。

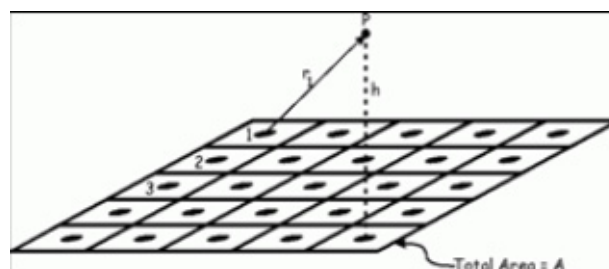


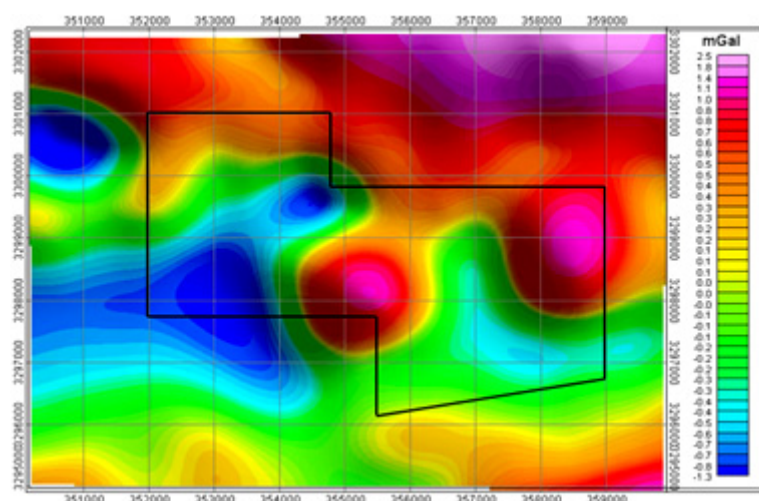
图 3.2 重力异常向上延拓示意图

Figure 3.2 The schematic plot of gravity anomaly upward continuation

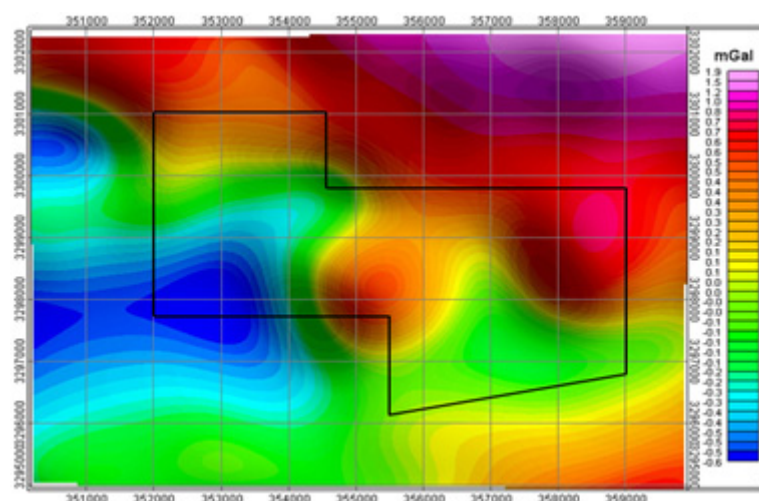
理论上，向上延拓法是可以实现的，导致其误差的产生除了积分范围的限制外，还与取值点的密度和插值的有相当大的关系，当上延高度较小时其结果值变化并不大。在最佳向上延拓的高度的选择上，曾华霖等人认为通过计算出两个相邻延拓高度值的互相关系数与延拓高度的关系，其关系曲线存在一个拐点，而拐点所对应的高度则就是最佳向上延拓的高度<sup>[45]</sup>。

图 3.3 为邓家山矿田的原始布格重力异常的解析延拓过程，本文向上延拓选取的高度依次是 0.1km、0.5km、1km、3km。对比图 3.1 可知，随着延拓高度的增加，矿区两处重力异常高值区逐渐减弱，在向上延拓 1km 后，矿区中部重力异常高值区已消失，由此可推断该区域的高密度体埋藏较浅，而矿区西南部重力

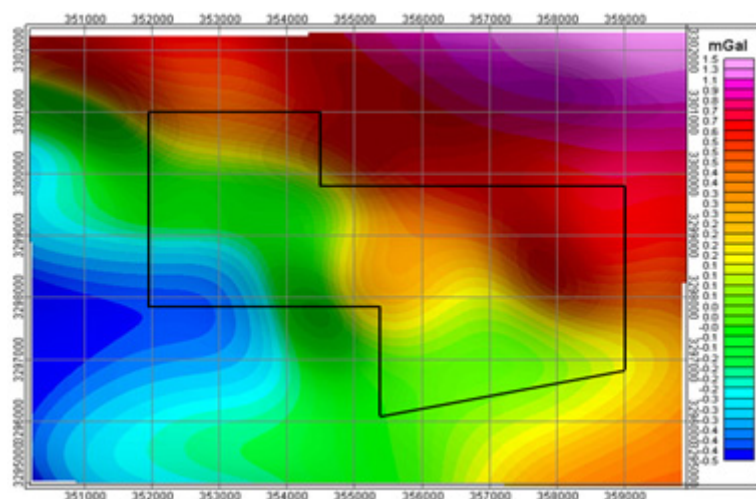
低值异常区域则有向西南向缩小的趋势，重力异常值增加，其幅度变化不大，而东南部低值一小块重力异常区域在延拓 500m 后消失，说明该处异常埋藏较浅。结合地质资料分析，推测出矿区重力高值区可能是由三叠系灰岩引起的，矿区西北部及东南部重力低值区域则可能是由花岗闪长斑岩引起的。



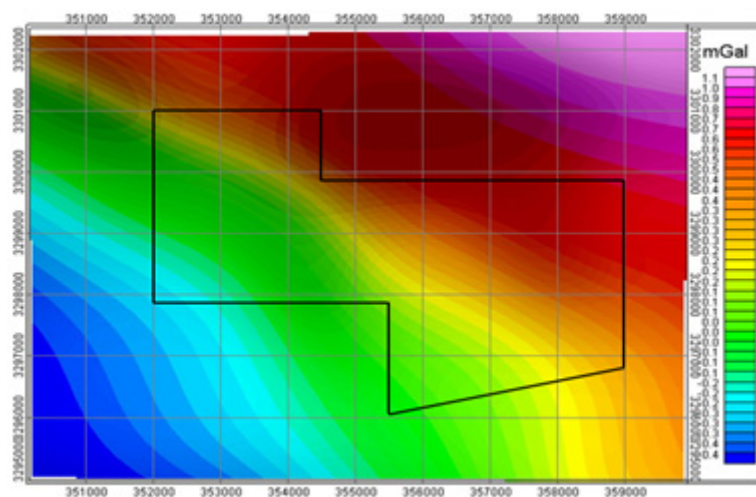
a 向上延拓 0.1Km



b 向上延拓 0.5Km



c 向上延拓 1Km



d 向上延拓 3Km

图 3.3 邓家山矿田重力异常向上延拓异常分布图

Figure3.3 The upward continuation of Bouguer gravity anomaly in the Dengjiashan ore district

## 3.2 磁法数据处理

### 3.2.1 矿区磁异常特征

为了探寻邓家山矿田总磁场特征、磁异常分布特征，以及探明磁场与构造、岩石和矿产的关系，在九瑞矿集区 1:5 万航磁测量基础上，对邓家山矿田开展了测线方向为南北向，测网密度为  $100\text{m} \times 40\text{m}$ ，工作量为  $22\text{Km}^2$ ，比例尺为 1:1 万高精度地面磁法测量工作。将采集的原始数据经过总基站改正、正常场改正以及高度改正后，同时剔除了少数畸变点，最后得到邓家山矿田的磁异常分布图(图 3.4)。



由图可见，矿区内除了少许区域正异常与负异常相互交替，总体 $\Delta T$  磁异常由南到北呈由高到低分布，其变化较平缓，在磁异常最大值为 873nT，最小值约为-344nT，两者相差 529nT。正异常主要分布在研究区西南及南部区域，偶尔有少数分布在北部区域，其中区内有三处较大规模的正异常体，其他则呈零散状态分布。由于研究区内大部分磁性岩体分布较散，埋藏深度较高，且区内矿企、工业电流造成的干扰较严重，对地面磁测数据的质量造成了一定的影响，因此，采取一些手段压制干扰和提高数据的质量是很有必要的。与此同时，将邓家山矿田的航磁数据进行处理后，得到航磁异常分布，如图 3.5。通过与图 3.4 对比可知，除了少数区域磁异常的分布特征有点差别外，其他的基本相符，说明了此次地面高精度磁测数据可靠性较高。

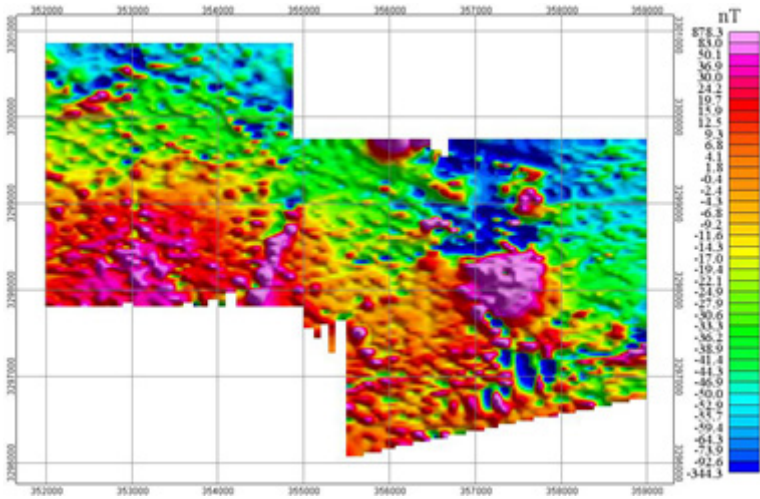


图 3.4 邓家山矿田磁异常分布图

Figure 3.4 The magnetic anomaly map of the Dengjiashan ore district

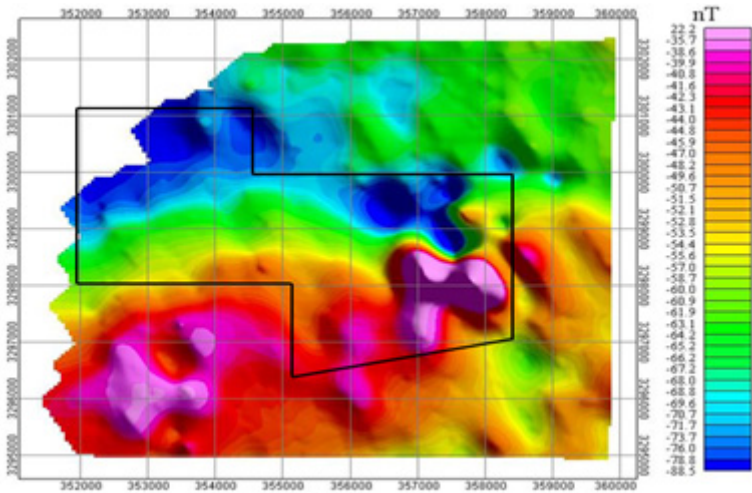


图 3.5 邓家山矿田航磁异常分布图

Figure 3.5 The aeromagnetic anomaly map of the Dengjiashan ore district

3.2.2 Butterworth 滤波

针对矿区人文噪声较大的情况，我们对化极后的磁测数据进行滤波处理，其目的是压制或降低干扰，突出有用异常。滤波包括一维、二维滤波，二维滤波主要有褶积滤波（时间域）和傅立叶滤波（空间域）两种。本文通过对磁测数据采用几种滤波器处理后，对结果进行比较分析后认为 Butterworth 滤波器的效果较好，该滤波器最大的特点是在带通内具有最大平坦的振幅特性，幅度平方函数形式如下：

$$L(k)=\frac{1}{\left[1+\left(\frac{k}{k_c}\right)^n\right]} \tag{3.2}$$

式中  $k_c$  是中心波数， $n$  是滤波器的阶数，其幅频特征示意如图 3.6 所示：

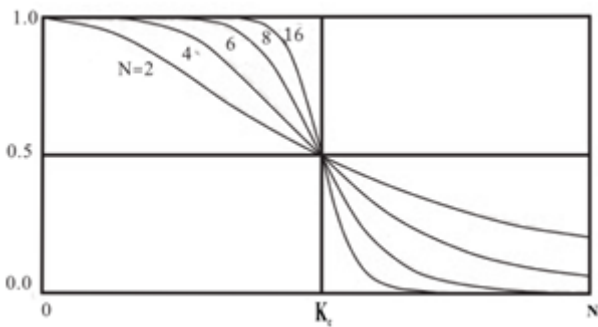


图 3.6 Butterworth 滤波器幅频特征示意图

Figure 3.6 The schematic plot of amplitude-frequency characteristic of Butterworth filter

本文通过选取多组滤波器阶数和截止波长参数进行对比分析，最终选择采用的滤波器阶数  $n=8$ ,截止波长为 200 作为此次磁测数据的滤波参数。滤波后的磁场特征如图 3.7 所示：对比滤波前（图 3.4）矿区磁异常特征发现，滤波后高磁异常与低磁异常分界明显，较好地压制了人工遗漏的畸变点所造成的干扰。

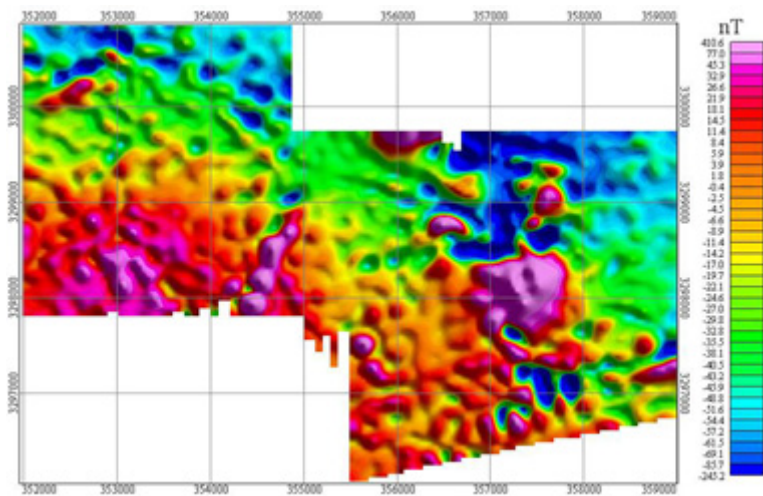


图 3.7 邓家山矿田磁异常分布图(Butterworth 滤波后)

Figure 3.7 The magnetic anomaly after Filtering by Butterworth diagram of Dengjiashan ore district

### 3.2.3 化极处理

在理想磁化条件下（垂直磁化），磁异常的形态与磁性体之间的关系比较简单<sup>[46]</sup>。矿区属于中纬度地区，磁异常具有斜磁化特征，斜磁化使磁异常产生相伴生的正负异常；通常情况下负异常往往产生在磁性体的北边，正异常则在磁性体的南侧，通常正负异常的中心会偏离磁性体中心而不一致，偏移距离的大小则与磁性体的规模、顶面埋深密切相关，并随之增大而增大。异常的偏移给地下目标体构造走向的识别带来了很大的不便。化极的核心思想是由磁场求得磁位，之后求取假重力位，再求出线磁化方向的磁位，然后导出新磁化方向下的磁场垂直分量，从而完成化向磁极。

三维磁性体磁场频谱积分表达式：

$$T(u, v, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} q_l \cdot q_l \cdot \int_0^\infty \tilde{v}(u, v, z - \zeta) d\zeta \quad (3.3)$$

由(3.3)式可以导出：

$$\frac{q_{l2}}{q_{l1}} = \frac{2\pi \left[ i(a_2 u + \beta_2 v) + \gamma_2 (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \right]}{2\pi \left[ i(a_1 u + \beta_1 v) + \gamma_1 (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (3.4)$$

式中： $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 为原磁化方向的方向余弦， $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ 为新磁化方向的方向余弦（磁化方向即为磁化强度方向）。式（3.4）适用于转换到任意磁化方向。若要转换到垂直磁化，只需令 $\alpha_2 = 0, \beta_2 = 0, \gamma_2 = 1$ 即可，此时换算因子为

$\frac{2\pi(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{q_{l1}}$ 。对 $\Delta T$ 化地磁极，需要考虑 $\Delta T \rightarrow \Delta Z_a$ 和 $\Delta Z_a \rightarrow \Delta Z_\perp$ 的转换，即综合

考虑磁化方向与分量转换。经过两种换算后可求得 $\Delta T$ 化到磁极的换算因子为

$\frac{\left[ 2\pi(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \right]^2}{q_{l1} \cdot q_{l1}}$ ，通常情况下，磁化方向与地磁场方向一致， $q_{l0}$ 与 $q_{l1}$ 相同，故 $\Delta T$

到磁极的因子为：

$$\frac{\left[ 2\pi(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \right]^2}{\left\{ 2\pi \left[ i(L_0 \mu + M_0 v) + N_0 (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^2} \quad (3.5)$$

由上述方法将矿区磁测数据经过化极处理后，化极结果如图 3.8 所示：通过对比原始磁异常分布图 3.4 可以看出，化极后的磁异常值的大小、形态均发生了变化，主要体现在如下几个方面：首先，矿区正异常位置向北偏移，且正异常范



围稍许扩大了点;其次,化极后正异常和负异常强度值都比化极前的值有所增加,其中正异常极值变化了 200nT,负异常极值则增加了约为 53nT。

结合研究区地质资料及航磁异常图,在图 3.11 中圈出了 3 处主要的局部异常区,分别标为“1, 2, 3”,其地质意义如下:

1) 此异常是一高值正异常,磁异常值大小约为 110nT 左右,而周围负异常值大小约为-30nT,其规模大小在矿区内最大,呈南北走向。据矿区地质资料,该异常位于矿区成矿母岩花岗闪长斑岩所在区域,据岩性资料,花岗闪长斑岩呈高磁性特征,因此,该异常是由花岗闪长斑岩引起,其边缘接触带则是成矿有利地带,具有较大的找矿意义。

2) 该异常为一沿北北东向呈长条状的高值异常,极大值为 112nT,主要位于矿区三叠系嘉陵江组灰岩地层中,少部分区域在三叠系大冶组和二叠系茅口组地层;此外,矿区内三叠系与二叠系的层间接触带是利含矿层,由此推测该异常可能是由沿北东向的断裂侵入的花岗闪长斑岩引起的高磁异常,具有间接找矿的意义;此外,该处正异常与周边负异常的接触位置可能是成矿有利地带。

3) 该异常为负异常中凸起的串珠状的正异常,呈北东东向,异常所在区域主体为花岗闪长斑岩,其他是三叠系嘉陵江组灰岩以及大理岩。该区域附近有两个金矿点:竹林唐和落鹰嘴金矿,且花岗闪长斑岩的侵入受北东东向的 F<sub>1</sub> 断层控制,故该区域具有较大的找矿前景。

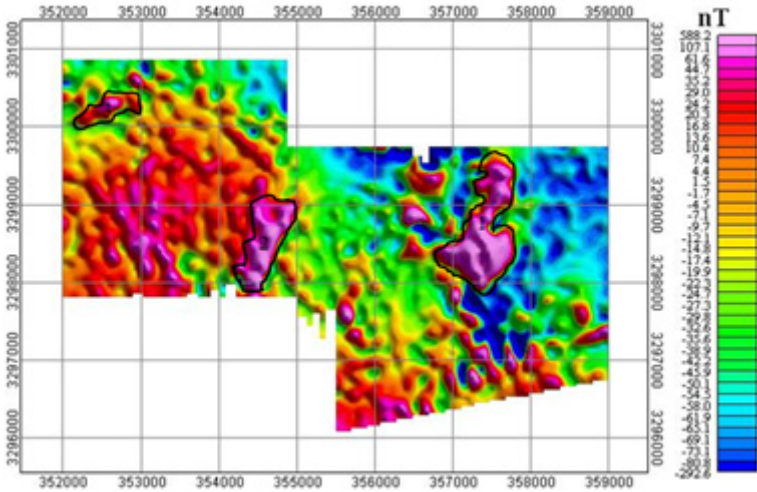


图 3.8 邓家山矿田 $\Delta T$  化极后异常分布图

Figure 3.8 The magnetic anomaly map after reduce to magnetic pole of the Dengjiashan ore district

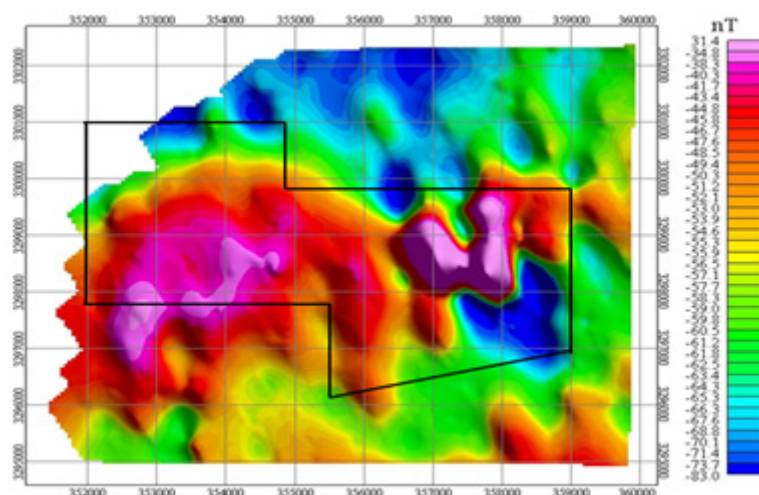


图 3.9 邓家山矿田航磁 $\Delta T$  化极后异常分布图

Figure 3.9 The aeromagnetic anomaly map after reduce to magnetic pole of the Dengjiashan ore district

### 3.2.4 解析延拓处理

磁法数据解析延拓就是将某观测平面的磁异常换算成场源以外某空间位置的磁异常，当换算平面位于观测面之上时，此时延拓称为向上延拓，其目的主要是突出深部异常，减弱浅部异常。三维磁性体异常的延拓计算公式如下：

$$T(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} S_T(u, v, 0) e^{2\pi(u^2+v^2)^{1/2} \cdot z} e^{2\pi i(ux+vy)} du dv \quad (3.6)$$

式中当  $z > 0$  时为向下延拓，而  $z < 0$  时为向上延拓。

根据上述方法，对矿区的磁法数据进行向上延拓处理，选择上延的高度依次为 0.1km、0.3km、0.5km、1km，其向上延拓结果如图（3.9~3.12）所示：

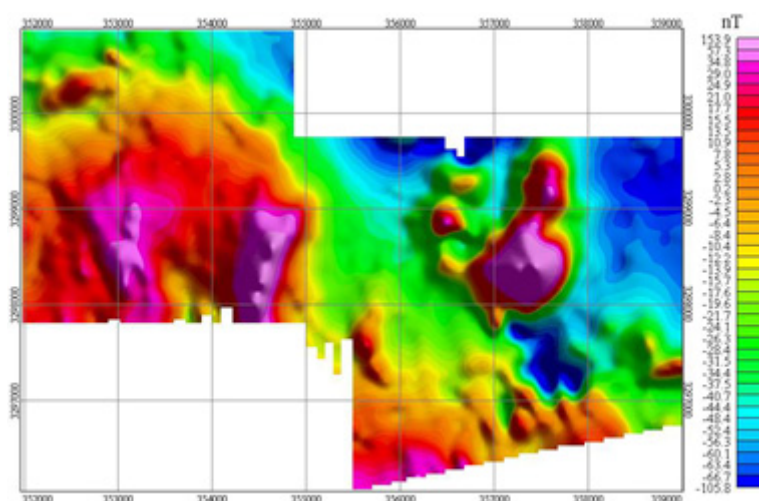


图 3.10 邓家山矿田 $\Delta T$  磁异常向上延拓 0.1km

Figure 3.10 The  $\Delta T$  magnetic anomaly map by upward continuation(0.1km) of the Dengjiashan ore district

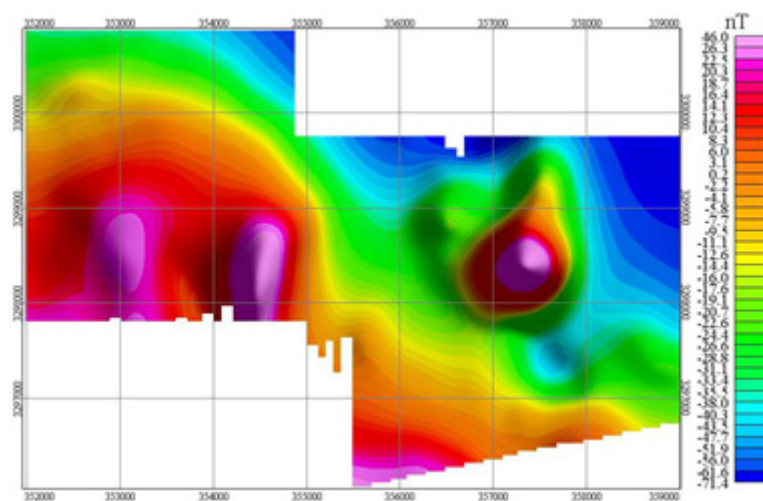


图 3.11 邓家山矿田 $\Delta T$  磁异常向上延拓 0.3km

Figure 3.10 The  $\Delta T$  magnetic anomaly map by upward continuation(0.3km) of the Dengjiashan ore district

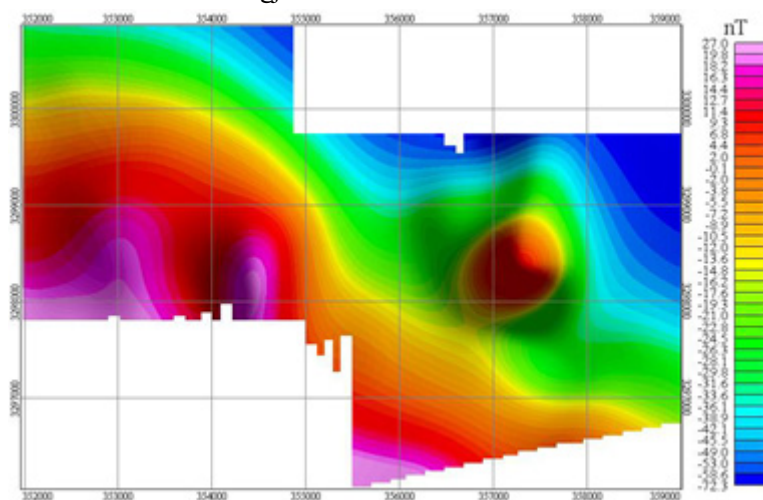


图 3.12 邓家山矿田 $\Delta T$  磁异常向上延拓 0.5km

Figure 3.11 The  $\Delta T$  magnetic anomaly map by upward continuation(0.5km) of the Dengjiashan ore district

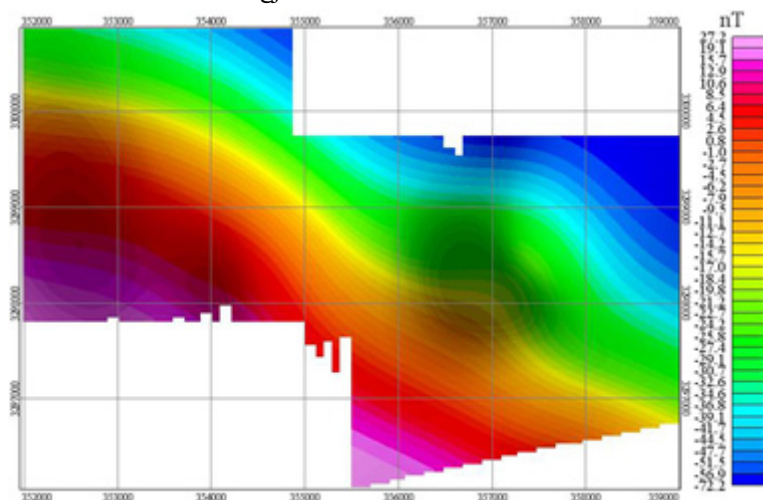


图 3.13 邓家山矿田 $\Delta T$  磁异常向上延拓 1km

Figure 3.13 The  $\Delta T$  magnetic anomaly map by upward continuation(1km) of the Dengjiashan ore district

从图(3.10~3.13)可以看出,随着上延高度的增加,研究区内磁异常的强度以及形态都发生了变化。其变化特征主要表现在:矿区磁异常区域形状逐渐圆滑,异常值逐渐减小;此外,随着上延高度的增加,矿区内高磁异常逐渐沿西南方向收缩,而低磁异常则扩张,但扩张范围不大,最后形成矿区西南部为高磁异常区域,东北部则为低磁异常区域,由此可以推断出,矿区西南部深部有较大的磁性体存在,说明该位置深部可能为岩浆岩的侵入口,岩浆由该位置由北东向及北西向分别向东北部和西北部侵入,形成了矿区现有的磁异常如图 3.8,说明该区存在北东向及北西向的基底断裂,是区内的导岩通道;同时也显示出在矿区西北部区域有近东西向的褶皱断裂,是该区的运岩及运矿构造。与此同时,随着上延高度的增加,矿区东北部和中部区域逐渐消失的高磁性体推断为埋藏深度浅的花岗闪长斑岩。

通过对比重力异常延拓结果发现:矿区内重力高值异常区域对应的是磁异常低值区域。根据矿区地层岩石的物性资料,三叠系、二叠系灰岩密度较高,剩磁较低,而花岗闪长斑岩则密度较低,剩磁较高,由此可以看出重力和磁异常特征基本上一致。

### 3.3 欧拉 3D 反褶积解释

#### 3.3.1 欧拉 3D 反褶积理论基础

欧拉 3D 反褶积是近十多年发展起来的一种利用重磁数据确定地下目标体场源位置和埋深的自动定量反演方法,该方法适用于计算区域重磁异常场源的深度,且不需要用已知的地质信息进行约束。欧拉三维齐次方程最早是由 Reid 在 Tompson 二维欧拉褶积反演方法的基础上将欧拉齐次方程与位场的异常函数相对应,将二维欧拉反褶积方法推广到三维网格数据的计算中,扩展了欧拉反褶积反演算法的适用范围。在直角坐标系中,如果函数  $f(x, y, z)$  满足:

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z) \quad (3.7)$$

则认为函数  $f(x, y, z)$  是  $n$  阶齐次的。证明如下:假设  $f(x, y, z)$  是  $n$  阶齐次的,且令  $t=1$ , 则满足:

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf \quad (3.8)$$

上式就是欧拉齐次方程(欧拉方程)。

设地质目标体场源  $(x_0, y_0, z_0)$ , 在观测点  $(x, y, z)$  的位场函数  $f(x, y, z)$  的表达式为:

$$f(x, y, z) = k / r^N, N=1, 2, 3 \dots \quad (3.9)$$

其中,  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$  为观测点  $(x, y, z)$  至场源  $(x_0, y_0, z_0)$  的距离,  $k$  则是一常数且与  $x, y, z$  无关。函数 3.9 是  $f(x, y, z)$  是关于  $n=-N$  阶齐次的, 一般来说, 规则的重磁场源都满足该方程, 只是  $N$  的选择不同而已。因此, 式 3.9 必满足:

$$(x-x_0)\frac{\partial f}{\partial x} + (y-y_0)\frac{\partial f}{\partial y} + z_0\frac{\partial f}{\partial z} = -Nf(x, y) \quad (3.10)$$

式中  $N$  为异常幅值随距离增大的衰减系数, 其与场源的空间形态、位置相关, 即构造系数。不同的地质体的构造指数也不同, 且构造指数与场源水平位置关系不大, 而与场源垂直距离呈线性关系<sup>[47]</sup>。

若  $\frac{\partial f}{\partial y} = 0$  时, 代入式 (3.10) 就变为:

$$(x-x_0)\frac{\partial f}{\partial x} + z_0\frac{\partial f}{\partial z} = -Nf(x, y) \quad (3.11)$$

式 (3.11) 就是欧拉二维反褶积方程, 若考虑一定范围内的背景场或区域场  $B$  的影响, 则 (3.11) 式可改写为:

$$(x-x_0)\frac{\partial f}{\partial x} + z_0\frac{\partial f}{\partial z} = -N(f-B) \quad (3.12)$$

在式 (3.12) 基础上, Reid 提出了欧拉三维齐次方程:

$$(x-x_0)\frac{\partial f}{\partial x} + (y-y_0)\frac{\partial f}{\partial y} + z_0\frac{\partial f}{\partial z} = -N(f-B) \quad (3.13)$$

欧拉三维反褶积方法中构造系数  $N$  是很重要的一个参数, 通常来说, 构造系数选择的是否合理直接影响到结果的准确性。在实际应用过程中, 在缺少地下目标体信息的情况下, 确定合适的构造指数有较大的困难。构造指数实际上就是地下目标场源的形状参数, 选取构造指数的方法主要有人工选定和自动估算。人工选定构造指数取得好的效果取决于对异常的反演数据和区域地质特征的认知情况以及地质目标体相对简单的构造形态。自动估算构造指数主要是借助高性能的计算机运算改进的计算算法而实现的, 其主要特点就是自动化程度高、运算速度快从而提高了反演的效率和结果。表 3.1 是重力、磁场源的构造系数与地质目标体的对应关系表, 一般来说, 形状规则的重磁异常源的构造指数大多为正, 为负的情况一般考虑较少。

表 3.1 重力、磁力场源构造系数参数表

Table3.1 The table of structural index of gravity and magnetic field source

SI	磁场	重力场
0	接触带/台阶	岩墙/岩床/台阶
1	岩墙/岩床	柱体
2	柱体	球体
3	球体/岩浆通道/未知爆炸物	N/A



### 3.3.2 重磁欧拉 3D 反褶积反演与解释

根据上述理论,对矿区的重磁数据进行欧拉 3D 反褶积处理,其目标是确定矿区内构造分区及找出可能的构造分区和断裂带。根据矿区地质资料和重磁构造系数参数表(表 3.1)选取重力、磁异常场源的构造系数,重力异常采用的构造系数  $N=0$ ,而磁异常场源构造系数  $N=1$ ,其意义是矿区重磁场源是以岩墙形态出现的。此外,在反演计算过程中的窗口选择则通过试验来选择合适的窗口,本次采用的窗口大小为 20 个 cell,即搜索窗口宽度大小为 1000m,经过欧拉 3D 反褶积反演计算后,得到结果(图 3.14~3.15)。从重力欧拉 3D 反褶积反演结果来看,矿区内断裂主要出现在高密度体和低密度体的接触位置,断裂大多数近东西向发育,并与少数北东、北西向断裂交错,形态有规律。而磁法欧拉 3D 反褶积反褶积成果图相对于重力看起来较凌乱,但也较为清晰的反映了矿区的断裂构造,从图 3.14 可以看出,大部分构造主要集中在正异常体区域,以及少数分布在正异常体与负异常体的接触带上。根据重磁欧拉 3D 反褶积反演结果,矿区内可分为 7 条断裂,其中,北东、北东东向断裂 4 条,分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  北西、北西西向断裂 3 条,分别为  $F_5$ 、 $F_6$  及  $F_7$ 。据地质资料,这些断裂很好的反映了邓家山矿田的近东西向褶皱构造的特征。

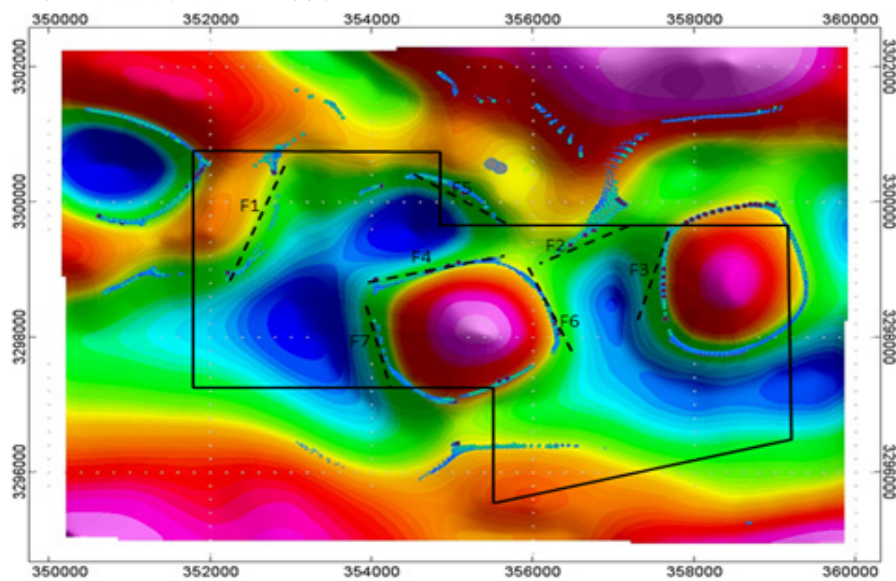


图 3.14 重力欧拉 3D 反褶积成果图

Figure3.13 The results map of 3D Euler deconvolution of gravity

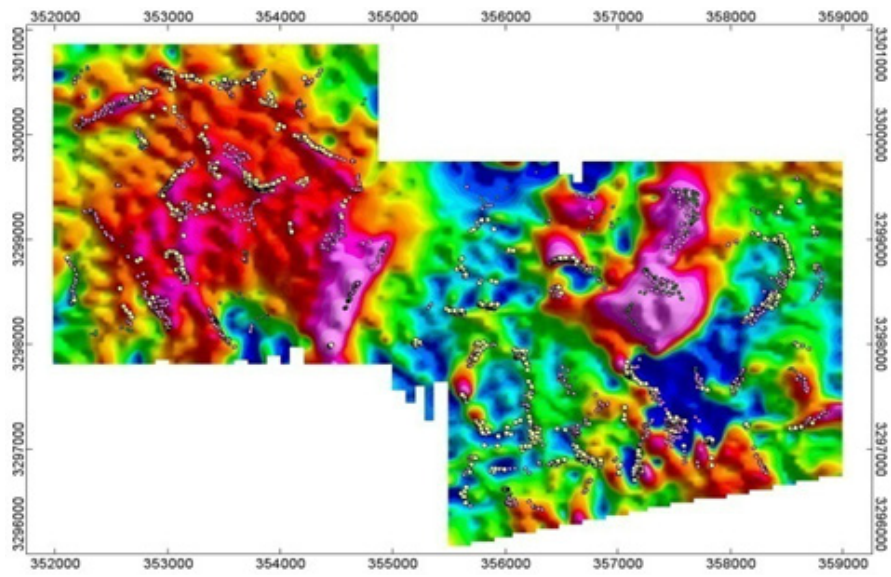


图 3.15 磁法欧拉 3D 反褶积成果图

Figure 3.14 The results map of 3D Euler deconvolution of magnetic

## 4 电磁法数据处理及解译

重磁探测技术在探测地下矿体异常的横向分辨率较高,其垂向分辨率和分层能力则较差,电磁法探测技术则能很好的弥补重磁探测技术这一缺陷,因此,为了探明地下垂向不同深度范围岩(矿)层电阻率的变化情况以及构造的基本形态,在矿区垂直构造走向(南北向)布置了5条可控源音频大地电磁测深(CSAMT)测线(图4.1)。其中,L1、L2、L3布设在邓家山矿区,L4、L5布设在东雷湾矿区。同时,为了比较多种电磁法在矿区的应用效果,在东雷湾矿区的L5号线另布设了一条音频大地电磁测深(AMT)及大功率激电测深(TDIP)测线,点距为60m,如图4.1所示。

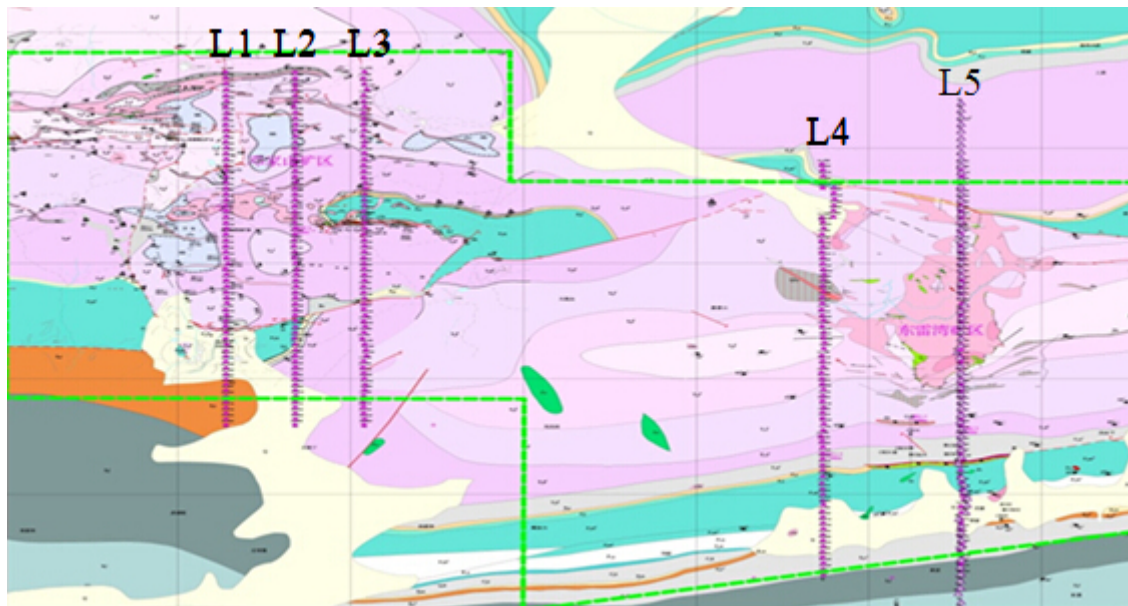


图 4.1 邓家山矿田测线布置图

Figure 4.1 The survey line layout map of Dengjiashan ore district

### 4.1 电磁测深方法原理简介

#### 4.1.1 音频大地电磁测深方法原理

音频大地电磁测深法(AMT)是以天然电磁场信号为场源,通过观测时间序列信号,将时间序列数据转化为频率域数据,进而计算出每个频点的视电阻率值和相位阻抗。本次工作采用的仪器是加拿大凤凰公司的V8多动能电法工作站,是目前在国内固体矿产勘查中应用较广泛的一种多功能电法工作站。其野外工作装置示意图如图4.2所示。其观测的基本参数为正交的电场分量( $E_x$ ,  $E_y$ )和磁场分量( $H_x$ ,  $H_y$ )。若将地表天然电场与磁场分量的比值定义为波阻抗,那么,



在均匀大地背景下，此阻抗与入射场极化无关，只与大地电阻率以及电磁场的频率有关<sup>[48]</sup>：

$$Z = \sqrt{\pi \rho \mu f} (1-i) \quad (4.1)$$

上式（4.1）中： $f, \rho, \mu$  分别为频率、电阻率和磁导率。由此可确定大地电阻率为：

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right| \quad (4.2)$$

式中： $\rho$  的单位是  $\Omega \cdot m$ ， $E$  的单位是  $mv/km$ ， $H$  的单位为  $nT$ 。

对于水平分层的介质，上述表达式仍然适用。但用它计算得到的电阻率将随频率的改变而变化，因为电磁波的大地穿透深度（或趋肤深度）与频率有关，表达式为：

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4.3)$$

在一个宽频带上通过测量相互正交的电场分量和磁场分量，可确定介质的视电阻率值，通过反演可以确定地下介质的电性和构造特征。

音频大地电磁测深方法（AMT）设备轻便，不受高阻层屏蔽影响，且对低阻层反应灵敏等优点。近几年在研究地下岩(矿)石电性结构及分布特征和金属矿产勘查等多个方面应用比较广泛<sup>[49~50]</sup>。本次 AMT 测量工作采用的是 V8 多功能电法仪，测量装置为十字装置（即 TE+TM 模式），点距为 60m，测量极距为 20m。

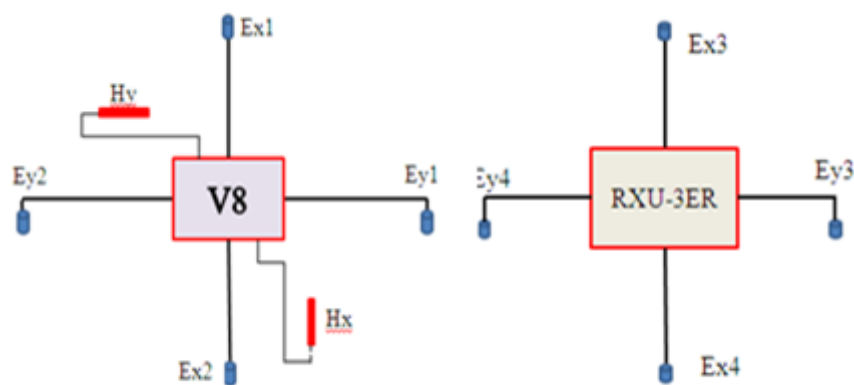


图 4.2 AMT 数据采集装置示意图

Figure 4.2 The Plant arrangement of AMT in data acquisition

#### 4.1.2 可控源音频大地电磁测深方法原理

可控源音频大地电磁测深法（CSAMT）是一种在大地电磁测深法（MT）和音频大地电磁测深法（AMT）基础上发展起来的一种人工源频率域电磁测深法。

为了克服音频( $n \times 10^{-1} \sim n \times 10^3 \text{ Hz}$ )大地电磁法 (AMT) 观测上的一些困难, 20 世纪 70 年代初, D W Strangway 教授和他的学生 M A Goldstein 提出沿用 AMT 的测量方式, 观测人工供电产生的音频电磁场。该方法通过人工向地下供入电流建立电磁场, 采用 AMT 的测量装置来观测正交电场  $E_x$  和磁场分量  $H_y$ , 计算卡尼亚视电阻率  $\rho_s$ 。

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} \quad (4.4)$$

$$\varphi_z = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y} \quad (4.5)$$

式中:  $\rho_s$  是卡尼亚视电阻率,  $E_x$  和  $H_y$  分别为电场分量和与之正交的磁场分量,  $f$  为频率。  $\varphi_z$  为阻抗相位,  $\varphi_{E_x}$  和  $\varphi_{H_y}$  分别为  $E_x$  和  $H_y$  的相位。

对于地下不同深度的电阻率测量通常是通过改变频率来达到测深的目的, 根据趋肤深度公式:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4.6)$$

由式 (4.6) 可知, 趋肤深度 ( $\delta$ ) 随电阻率 ( $\rho$ ) 和频率 ( $f$ ) 变化而变化, 频率增大, 勘探深度减小; 频率降低, 勘探深度增大。根据这一原理, CSAMT 可以通过人工改变发射频率来达到探测地下不同深度的电性结构情况。

可控源音频大地电磁测深法具有探测深度大 (通常可达 1~2km)、分辨能力强、观测效率高、受高阻屏蔽作用影响小的特点, 并同时具有测深和剖面研究的双重特点, 是研究深部地质构造、寻找隐伏矿和地下水资源勘查的有效手段, 在国内外水资源勘查、地热勘查和铝、铜、金、银、铅锌、铀等隐伏矿勘查中已得到广泛应用<sup>[51~56]</sup>。

本次在邓家山矿田开展可控源音频大地电磁测深 (CSAMT) 的工作装置是赤道装置, 测量方式则是标量 CSAMT 法。发射偶极距 AB 为 1.7Km, 收发距  $r$  为 17Km, 线距为 800m, 接收极距 50m, 发射频率为 9600~1Hz, 共 41 个频点, 低频发射电流为 16A, 可以保证原始数据的采集质量和工作任务所要求的探测深度, 其工作装置示意图如图 4.3 所示:

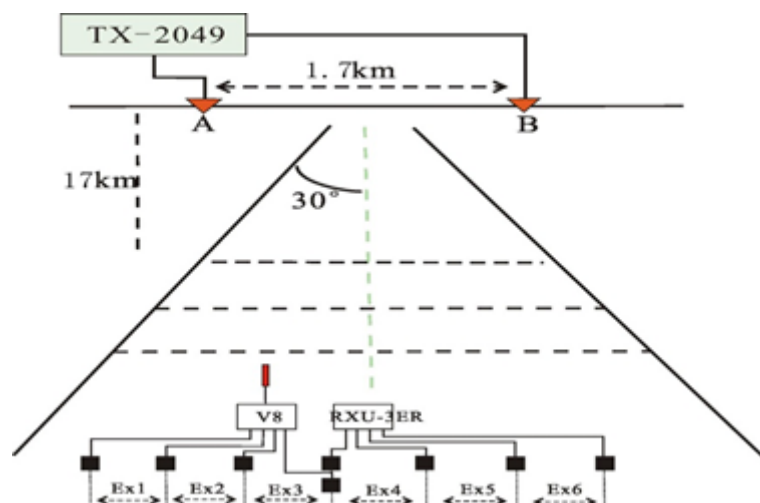


图 4.3 CSAMT 数据采集装置布置图

Figure 4.3 The Plant arrangement of CSAMT in data acquisition

### 4.1.3 时间域激电测深方法原理

时间域激发极化法（TDIP）是以地下岩（矿）石的激发极化效应差异为基础，通过人工向地下供入电流，并以某种装置的测量方式来观测地下岩（矿）石的横、纵向激发极化效应的变化的一种查明地下矿产资源和解决有关地质问题的地球物理方法。其视电阻率公式如下：

$$\rho_s = K \frac{\Delta U}{I} \quad (4.7)$$

式中： $K$ 为装置系数； $\Delta U$ 为测量电极间的电位差； $I$ 为供入地下的直流电流。在激发极化法中，为了表征地下介质的激发极化特性，引入了极化率，定义充电时间（ $T$ ）和放电取样时间（ $t$ ）的函数关系式：

$$\eta(T, t) = \frac{\Delta U_2(t)}{\Delta U_T} \times 100\% \quad (4.8)$$

由上式可以看出， $\eta$ 是用百分比表示的无量纲参数，且与电流无关。其中， $\Delta U_2(t)$

是指断电后  $t$  时刻的二次场电位差， $\Delta U_T$ 是指供电时间  $T$  的总场电位差。

此次在邓家山矿田开展的 TDIP 工作采用的是仪器是 V8 多功能电法工作系统，测量装置为偶极-偶极，点距为 60m，发射偶极距为 300 米，收发距 180 米，每个排列测量 24 个测点。如图 4.4 所示。

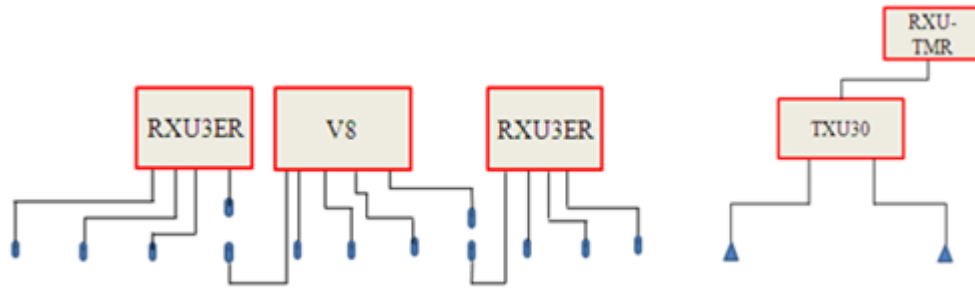


图 4.4 TDIP 数据采集装置布置图

Figure 4.4 The Plant arrangement of TDIP in data acquisition

## 4.2 非线性共轭梯度反演理论基础

本次的可控源音频大地电磁测深（CSAMT）和音频大地电磁测深（AMT）数据采用非线性共轭梯度法（NLCG）进行二维反演，该算法最早是由 Rodi 等人提出<sup>[57~59]</sup>。该算法通过使用非线性共轭梯度原理来直接求解方程组的最优解，具有计算速度快及内存占用率不高等优点；并且在反演过程中加入地形校正等因素，成为目前大地电磁反演中应用最广的算法之一。

假设在离散化的情况下，观测数据向量  $d = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T$  与地电模型向量  $m = [m_1, m_2, \dots, m_N]^T$  的关系可以写成泛函形式：

$$d = F(m) + e \quad (4.9)$$

式中  $e$  是观测数据与正演计算值的误差矢量， $F$  为目标函数，对于简单的电性结构， $F(m)$  可采用有限元数值计算方法等方法获得。然后通过正则化方法处理目标函数最小化问题，可得到目标方程：

$$\psi_m = (d - F(m))^T V^{-1} (d - F(m)) + \lambda m^T L^T L m \quad (4.10)$$

式中正则化因子  $\lambda$  是一个正数，其作用就是控制模型拟合的光滑度；正定矩阵  $V$  则表示误差矢量  $e$  的变化； $\psi$  定义一个模型空间上的稳定方程；选择矩阵  $L$  作为简单的二次差分算子，当模型网格唯一时， $Lm$  近似为  $\log \rho$  的拉普拉斯算子。用 Polak-Ribiere 的不同的非线性共轭梯度方法来最小化式(4.10)来表达目标方程  $\psi$ <sup>[60]</sup>。给定  $m$ ，则有：

$$\psi(m_i + a_i p_i) = \min_a \psi(m_i + a p_i) \quad (4.11)$$

式中矢量  $p$  为模型空间的搜索方向，标量  $a_i$  是步长。通过式 4.12 求  $m$  的极小值，迭代  $i+1$  次的解为：

$$m_{i+1} = m_i + a_i p_i, \quad i=1, 2, 3\cdots \quad (4.12)$$

搜索方向则如 4.13 所示：

$$p_0 = -C_o g_0 \quad (4.13)$$

$$p_i = -C_i g_i + \beta_i p_{i-1}, \quad i=1, 2, 3\cdots$$

其中，

$$\beta_i = \frac{g_i^T C_i (g_i - g_{i-1})}{g_{i-1}^T C_{i-1} g_{i-1}} \quad (4.14)$$

式中， $-C_i g$  项是另一个最速下降方向，即最小化  $\psi_i$  在  $m_i$  上的方向导数。

本文对矿区的 CSAMT 和 AMT 在经过预处理，剔除个别质量不可靠的畸变点。然后对数据进行圆滑、静态效应校正、1D 反演和 2D 反演。其数据处理流程如图 4.5 所示：



图 4.5 CSAMT 及 AMT 数据处理流程图

Figure 4.5 The flow-process diagram of the data processing of the CSAMT and AMT

### 4.3 多种电磁测深方法效果对比

为了验证比较多种电磁测深法在矿区的探测效果，选取矿区 L5 线两种方法的反演结果进行对比分析。图（4.6~4.8）依次为 CSAMT、AMT 及 TDIP 二维反演断面图，由 CSAMT 反演断面（图 4.6）可以得知：L5 线高阻体主要集中在 2000~2500 点浅中部区域，整个断面 500m 以下则为低阻区域，电性分界面明显，结合地质资料，浅中部高阻体基本上是由三叠系灰岩引起的，高阻体间夹杂着低阻异常则可能是侵入的花岗闪长斑岩的反映，中深部大范围的低阻异常则推测为二叠系茅口组炭质灰岩。

图 4.7 为 L5 线 AMT 二维反演断面图，由图可知：整个断面图高阻主要集中在剖面的中深部区域，且呈独立不规则体，推测主要是三叠系灰岩引起的，低阻体则呈条带状，在整个断面上分布较散乱，其中，断面中部区域 1000~2600 号点

之间有两处呈直立状的低阻体并向深部无限延伸，浅中部低阻体可能是由侵入的花岗闪长斑岩引起的，中深部低阻体则可能是由二叠系茅口组炭质灰岩的响应。

由 TDIP 反演断面（图 4.8）可以看出，L5 线 0~2300 点区域主要呈中高阻低极化的现象，而另一边浅部则是高阻体夹杂着低阻体，整体呈低极化特征，而地下 500~900m 为低阻高极化现象，据地质资料，引起这种现象的不是地下矿体而是由二叠系高含炭量的灰岩所导致的。

通过 L5 线 CSAMT、AMT 及 TDIP 反演结果结合钻孔资料分析，以上三种方法推断的岩体位置与资料大致吻合。但由于矿区内矿企、高压线等干扰源较多，AMT 虽能很好地区分高低阻异常，但垂向分层不明显，而 CSAMT 相对于在探测地下垂向的电性结构上优势较明显，较好地反映了地下矿体的空间分布。TDIP 则由于矿区内大规模的含炭灰岩层的影响，优势不明显，限制了该方法在矿区内的应用。综上所述，CSAMT 相对于 AMT 及 TDIP 在邓家山矿田复杂干扰环境下的开展深部找矿工作具有较大的优势。

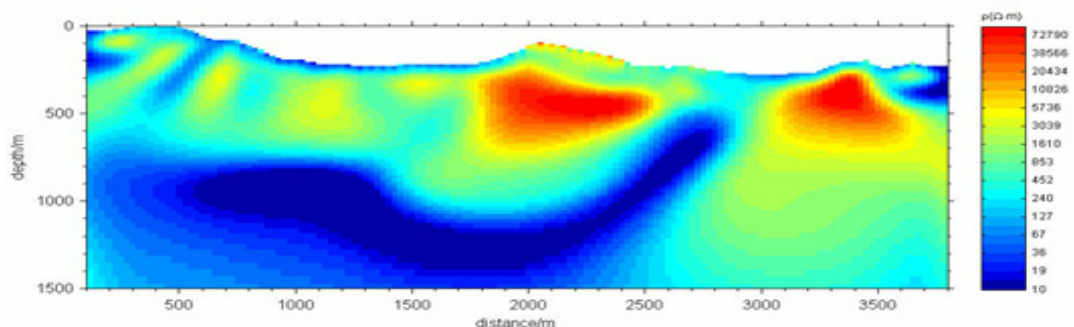


图 4.6 CSAMT 二维反演电阻率断面图

Figure 4.6 The CSAMT resistivity section of the 2D inversion

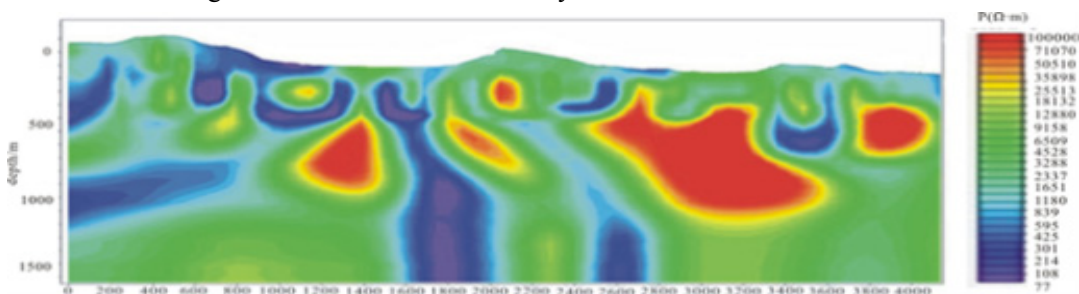


图 4.7 AMT 二维反演电阻率断面图

Figure 4.7 The AMT resistivity section of the 2D inversion

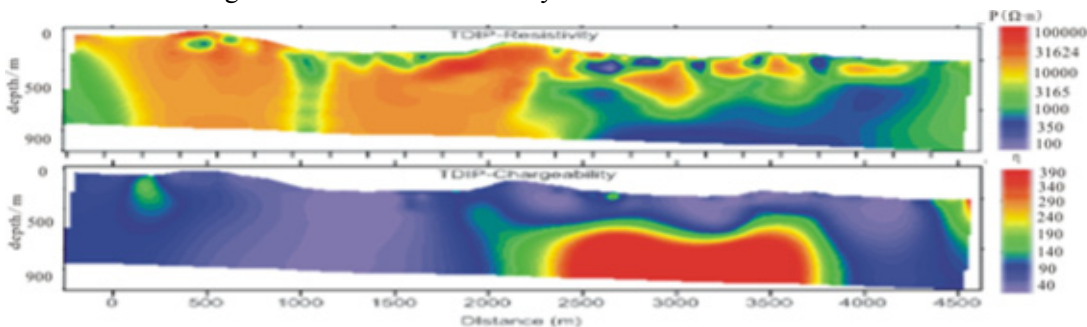


图 4.8 TDIP 二维反演断面图

Figure 4.8 The TDIP section of the 2D inversion

## 4.4 矿区电性结构特征及地质解释

邓家山矿田总共进行了 5 条 CSAMT 测量,其中邓家山矿区部署了 3 条测线 L1、L2 及 L3 如图 4.9 所示,矿区三条线的二维反演断面电性结构比较相似,以 L1 线为例对二维反演断面图进行解释,由图 4.9 (a) 可以得知,整个断面图在垂向电性分界面较明显,高阻体主要分布在 L1 线浅部区域,电阻率值在  $5000\sim 70000\Omega\cdot\text{m}$  变化,且呈独立状并沿测线方向排布,且高阻体之间夹杂着低阻体,越往北其规模越小。中深部区域主要为低阻带,其值大小在  $100\Omega\cdot\text{m}$  左右,在点号 1600~2300 间被一中阻体隔开,在深度 1000m 以下的地层电阻率大小变化不大,其值约在  $450\Omega\cdot\text{m}$  左右。结合地质资料,我们可以看出,在 L1 线最南边的规模最大的高阻体可能是由志留系纱帽组地层引起的,而其他高阻体则是由三叠系的灰岩引起的,在测线北边 2500 点处,出现高阻体间夹杂一低阻体的可能是由近东西向的断裂引起的,而测线最北端近地表区域的低阻异常则是由花岗闪长斑岩的反映。在断面点号 500~1500 的长条状的低阻带则可能是二叠系茅口组的含炭高的灰岩,据矿区的成矿机制来看,该低阻带与上面高阻体之间的接触面内富集成矿。

L2 线在 L1 线东 800m 处,测线方位与 L1 线相同,该断面图(图 4.9b)中规模大的高阻体主要集中在测线的南边,而北边的高阻体规模较小,相对于 L1 线,L2 线 500~1500 点之间中深部低阻异常则向深部延伸 1500m 处,其电阻率值变低,但变化范围不大。测线北边异常情况则变化不大,基本上与 L1 线情况类似。

L3 线在 L2 线东 800m 处,该断面(图 4.9c)整体电性结构特征与 L2 线差别不大,但在部分区域有少许差异,在 L3 测线点 2200~3000 之间的地下 500m 区域的低阻异常由北向南呈水平状扩张,其电阻率值较小,约为几十  $\Omega\cdot\text{m}$ ,据地质和岩性资料推断该处异常是二叠系茅口组含炭灰岩引起的。南边异常的情况与 L1 线类似,在这就不一一描述。

综上所述,以上三条 CSAMT 二维反演断面图基本上反映了邓家山矿区的地下电性结构情况与构造格局:在邓家山南部,在 L1 线 900、L2 线 1100 及 L3 线 1400 号点处,高阻体夹杂着低阻异常说明该处有一断层存在,据地质资料,该区域有一沿北东东向的断裂  $F_9$ ,并以近似东西向横跨 L1、L2 及 L3 线。据重磁资料,该区域异常特征是重低磁高,且在 L1 线及 L2 线  $F_9$  断裂处有少量的花岗闪长斑岩出露,与物探结果符合。此外,在该处地下 800m 处电性界面明显,据分析为三叠系与二叠系地层的接触面,据此推测在 L1 线 900 号点及 L2 线 1100 号点地下 800m 左右位置为有利含矿层位,且伴随着岩浆岩的侵入,形成矽卡岩型的矿床可能性较大,但规模不大。在 L3 线 2000 点处的区域的物性特征为中密度、高磁性、低电阻率特性,该处出露地层主要是二叠系茅口组地层,还有少量的龙潭组以及花岗闪长斑岩,此外还有角砾岩发育,据物性资料,二叠系龙潭组



相对于矿区其他地层密度属低密度层。据地质资料，该处有一位于矿区堡下-黄柏岩背斜的断层 F<sub>10</sub>，其走向为东西向，且向南倾，属剪切带型逆断层，沿断裂方向有花岗闪长斑岩的侵入，断层带铅锌金矿化普遍，堡下金矿点就是在该区域附近，因此推测在地下 500m 处成矿的可能性较大。

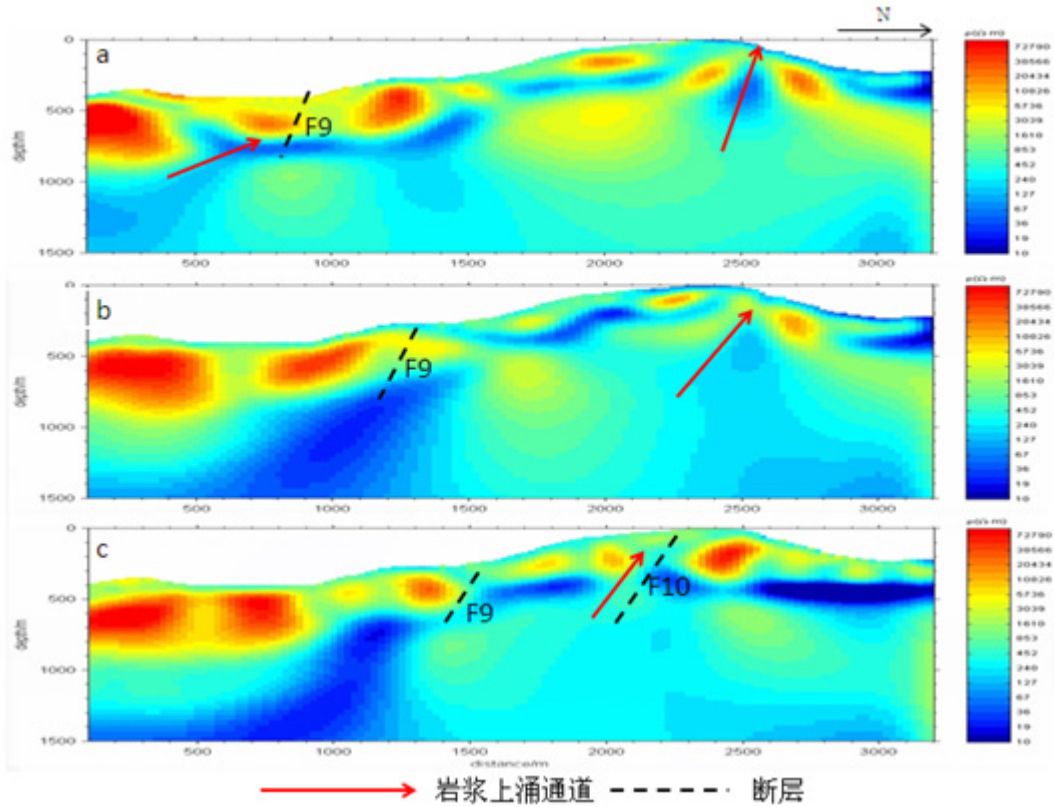


图 4.9 CSAMT 二维反演电阻率断面图

Figure 4.9 The CSAMT resistivity section of the 2D inversion

图 4.10 为东雷湾矿区的 CSAMT 测线 L4、L5 二维反演断面图，其中图 4.10 (a) 为东雷湾矿区的 L4 线 CSAMT 二维反演断面图，由图可以看出，整个断面视电阻率在  $10 \sim 70000 \Omega \cdot m$  之间变化，视电阻率差异较大。由断面图中可以看出，中、浅部出现了一些独立且不规则的高阻异常，此外，还有 3 个独立不规则的低阻异常，显示出电性差别较大，中深部的中部区域为视电阻率值范围在  $10 \sim 100 \Omega \cdot m$  的低阻层，左翼和右翼区域为视电阻率值范围在  $100 \sim 500 \Omega \cdot m$  的中阻层，电阻率值从左到右变化趋势为“V”字型。根据矿区地质和岩(矿)石物性资料，推断出浅部中部区域高阻异常应由三叠系灰岩，南边高阻异常(图右)为志留系纱帽组砂岩和页岩，北边高阻异常可能由二叠系茅口组上段灰岩引起，此外，在断面南边点 700~1400 之间有一独立椭圆形倾斜的低阻异常推断为二叠系茅口组炭质灰岩的响应，而中深部区域低阻推测可能是二叠系茅口组炭质灰岩引起的。

据图 4.10 (b) 可知，断面电性层可分为 4 层，第一层电阻率值在  $100 \Omega \cdot m$  左右，且厚度不大，埋深较浅，推测为第四系浮土、砂岩地层。第二层电阻率呈高值状态，其值范围在  $10000 \sim 20000 \Omega \cdot m$ ，据矿区地质和岩性资料，该层主要是三叠系嘉陵江组和大冶组的高密度的灰岩组成。第三层为低阻层，该层厚度较大，

主要是由二叠系茅口组、长兴组及龙潭组灰岩组成，据实际情况，该层的灰岩大多是含炭量较高，所以其电阻率呈现低阻状态，电阻率值总体在  $100\Omega\cdot\text{m}$  左右，由此可以看出二叠系与三叠系地层的电性差异很大，且电性分界面明显，根据矿区的地质资料，二叠系与三叠系地层的接触带是该区的成矿有利地带，据图 4.3 中第三层的构造走向可大致判断 P-T 地层接触带的走向和埋深。第四层为中低阻层，该层主要是由志留系纱帽组砂岩构成且埋藏深度较大，电阻率值在  $200\sim 1000\Omega\cdot\text{m}$ 。

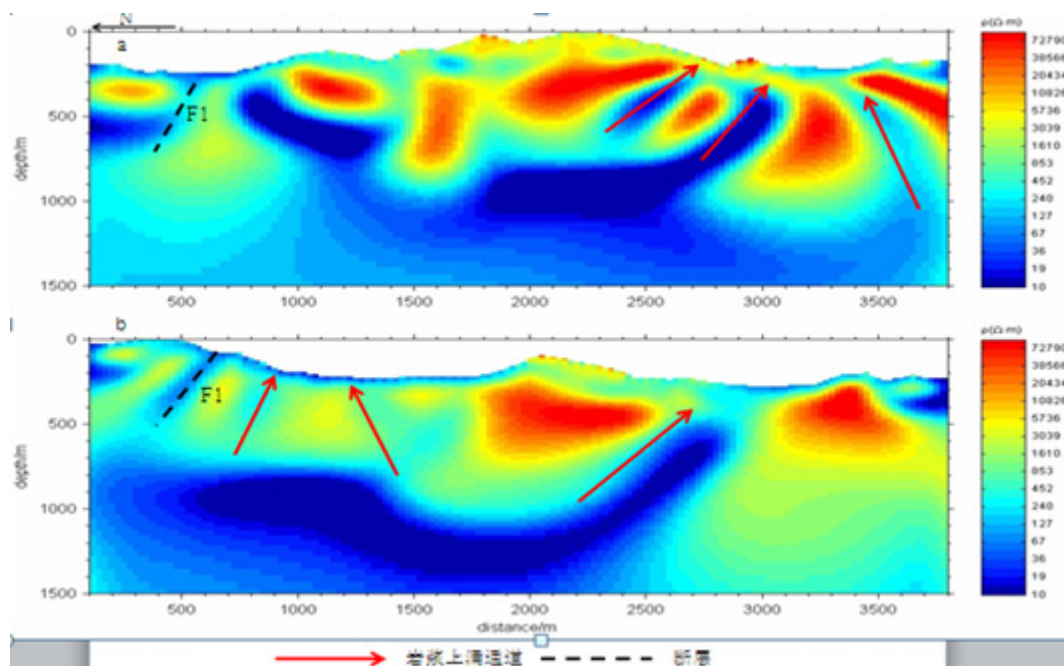


图 4.10 CSAMT 二维反演电阻率断面图

Figure 4.10 The CSAMT resistivity section of the 2D inversion

综上所述，对东雷湾矿区的地下电性结构特征有了大致的了解，在 L5 线北边 500 号点处，该区域地层低密度、高磁和低阻特性，据岩石物性资料，在该区域附近出露的地层主要是二叠系长兴组、三叠系嘉陵江组，此外还有花岗闪长斑岩。与物探结果符合。该处两高阻异常被一低阻异常隔离开来，可能是由一断裂造成的，根据地质资料，有一北西西向的断裂  $F_1$ ，花岗闪长斑岩由此侵入到地表，此外，该区域在地下 700m 左右有一明显的电性分界面，据地质和反演结果来看，为二叠系炭质灰岩与三叠系灰岩的接触面，是该区域的成矿有利位置，找矿潜力较大。L4 线北端 200m 处有一断裂存在，据地质资料推断同样为北西向断裂  $F_1$ ，该处成矿的可能性不大。

通过在邓家山矿田开展的重力、磁法及可控源音频大地电磁测深（CSAMT）多种地球物理方法在深部矿产勘查的应用过程中得知：重力、磁法在横向分辨能力较高，能很好地圈出构造断裂的位置及走向，而可控源音频大地电磁测深法（CSAMT）由于其电磁场穿透能力强的特点，相对于重磁方法在垂向方向的分辨和分层能力拥有较大的优势，较好地反映了矿区地下电性结构分层和展布情

况。因此，本文综合矿区重磁及可控源音频大地电磁测深（CSAMT）资料，并结合地质资料对邓家山矿田的深部成矿有利区域进行了圈定，达到预期的效果。由此说明在邓家山矿田深部矿产勘查工作中，开展重力、磁法和 CSAMT 这三种地球物理方法组合是可行的。



## 5 结论与建议

### 5.1 结论

1) 本文总结了九瑞矿集区的区域地质背景特征,分析了邓家山矿田的矿床地质特征和成矿规律:矿区内经过多期构造运动,东西向紧闭褶皱构造断裂是主要的控矿因素以及燕山晚期的大量的岩浆岩的侵入在不同围岩的条件下形成砂卡岩型为主的矿床。

2) 对邓家山矿田的地层及岩(矿)石的物性特征进行整理并分析:矿区内三叠系嘉陵江组和大冶组、二叠系长兴组、龙潭组和茅口组的地层为高密度、低磁性及高电阻率特征,但实际情况中,矿区内二叠系灰岩含炭量高,因此,大多数情况下电阻率呈低阻状态,而志留系纱帽组地层砂岩则呈低电阻率、高磁性、高密度。此外,矿区内成矿母岩花岗闪长斑岩出现磁性强、低密度、低电阻率的特征。

3) 对邓家山矿田 1:5 万重力、航磁数据和 1:1 万高精度地磁数据进行了滤波、化极、延拓等处理之后,将重磁原始异常和向上延拓后的结果进行对比分析,矿区的重磁异常特征出现了低密度异常对应高磁异常的现象,据地质和岩石物性资料,矿区的低密度异常与高磁异常是同一目标地质体引起的,说明了重磁异常特征与地质资料吻合度高。对重磁数据进行欧拉三维反褶积处理后,结合地质资料对矿区内构造及接触带位置进行了圈定。

4) 对邓家山矿田 1:1 万 CSAMT、AMT 及 TDIP 的数据进行整理,并对 CSAMT、AMT 数据进行二维非线性共轭梯度(NLCG)反演,通过对比以上三种电法勘探的反演结果,由于矿区内工业、人文干扰较大,在实际过程中严重影响了 AMT 的数据采集质量,进而限制了该方法在邓家山矿田的应用。TDIP 则是因为矿区内存在大规模的二叠系炭质灰岩,而导致应用效果不是很好,而 CSAMT 反演结果与矿区地质资料和钻孔资料吻合较好,较好地反映了矿区地下电性结构的分布情况,并结合重磁资料圈定了岩溶通道及二叠系与三叠系的接触带位置,证明了该方法适合在邓家山矿田开展工作。

5) 论文对在九瑞邓家山矿田开展的多种地球物理方法进行综合研究,弥补了单一方法的多解性的缺点,为矿区深部固体矿产勘探详查提供了一套合适的地球物理方法找矿组合。论文中首先通过重磁资料对矿区内重磁异常特征进行解释说明,找出异常体场源的分布位置,并分析区内的控岩控矿构造及侵入岩体的来源区域,结合 CSAMT 测深法对地下垂向电性结构分布进行评价。因此,在深部固体矿产勘探中对矿床的埋深、产状及规模的详查过程中,这就需要多种地球物

理方法进行综合研究，同时结合地质、岩石物性及钻孔资料进行综合分析，这样才能提高深部固体矿产勘探的效率和准确率。

## 5.2 建议

1) 论文仅对重、磁、电三种方法进行单独处理，如何将这三种方法进行联合反演是今后的工作的主要方向。

2) 论文仅对地质和地球物理方法进行深部找矿工作，而矿区内地球化学、遥感等工作开展的程度高，建议在今后的深部探测工作中，将其他方法资料进行综合利用，进一步的提高本区深部矿产勘查的认识。

## 致谢

时光如梭，转眼间，三年的研究生求学生涯即将结束，站在毕业的门槛上，回首往昔，奋斗和辛劳成为丝丝记忆，甜美与欢笑已尘埃落定。东华理工大学以其优良的学习风气，严谨的科研氛围教我求学，以其博大包容的情怀胸襟、浪漫充实的校园生活育我成人。值此毕业论文完成之际，我谨向所有关心、爱护和帮助我的人们表示最诚挚的感谢与最美好的祝愿。

本论文是在我的导师邓居智教授的悉心指导下完成的。三年来，邓老师以渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，朴实无华、平易近人的人格魅力对我影响深远。虽只历时三载，但赋予我终生受益无穷之道。本论文在选题到完成，每一步都是在邓老师的指导下完成的，倾注了导师大量的心血，在此向我的导师邓居智教授表示深切的谢意和祝福。

同时，本论文的完成也离不开我的师兄陈辉老师的悉心指导。在此衷心的感谢陈辉老师在我研究生期间对我的关心与帮助。

还要感谢我同门王浩臣、蒋亮、余辉、李磊、祝福荣、刘飞、蒋才洋在我生活上和学习上的帮助。大家在野外互相照顾与帮助，在室内互相学习、共同进步、无所保留、严谨协作的团队精神使我深受启发，让我在专业研究和做人上学到了许多。

还要感谢我的父母和伯伯在我求学生涯中给予我无微不至的关怀和照顾，一如既往的支持我，鼓励我。同时，感谢我的同班同学三年来对我的爱护、宽容及帮助，愿友谊长存。





## 参考文献

- [1]滕吉文.强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发[J].地质通报,2006.25(7):767~771.
- [2]董树文,李廷栋.SinoProbe—中国深部探测实验[J].地质学报,2009.83(7):895~909.
- [3]中国地质科学院矿产资源研究所.国外矿产资源深部找矿勘探的现状与趋势.2007.
- [4]涅克拉索夫 E M.与火山构造有空间关系的近地表矿床和浅成矿床[J].金属矿床地质与勘查译丛,1980.15.
- [5]戴自希,王家枢.矿产勘查百年[M].北京:地震出版社,2004.
- [6]吕庆田,史大年,赵金花等.深部矿产勘查的地震学方法:问题与前景—铜陵矿集区的应用实例[J].地质通报 2004.24(3):211~218.
- [7]中国有色金属工业总公司江西地质调查局,《江西银山铜铅锌金银矿床》编写组.江西银山铜铅锌金银矿床[M].北京:地质出版社,1996.
- [8]肖克炎,冯京,高兰,等.阿舍勒铜铅锌矿床及三维定位预测[M].北京:地质出版社,2002.
- [9]周涛发,范裕,袁峰等.长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J].岩石学报,2008.24(8):1665-1678.
- [10]刘光鼎,郝天珢.应用地球物理方法寻找隐伏矿[J].地球物理学报,1995.38(6):850~854.
- [11]Malehmir, A. Tryggvason, A, Juhlin, C, et. Al.. Seismic imaging and potential field modeling to delineate structures hosting VHMS deposits in the Skellefte Ore District, Northern Sweden [J].Tectonophysics,2006.426:319~334.
- [12]陈喜峰.关于深部找矿问题的思考[J].中国矿业,2011.20(6):70~73.
- [13]常印佛,刘湘培,吴言昌,等.长江中下游铜铁成矿带[M].北京地质出版社,1991.1~147.
- [14]Pam Y M, Dong P. The Lower changjiang (Yangzi/Yangtzeriver) metallogenic belt, east central China: intrusion-and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. Ore Geology Reviews[J].1999.15(4):177-242.
- [15]赵文津.长江中下游金属找矿前景与找矿方法[J].中国地质,2008.35(5):771-802.
- [16]King A. Deep drill hole electromagnetic surveys for nickle/copper silphides at Sudbury, Canada[J].Exploration Geophysics,1996.27:105-118.
- [17]Mark G. A comparison between conventional and distributed acquisition induced polarization surveys for gold exploration in Nevada[J]. The Leading Edge,2007.180~183.
- [18]Eso R, Oldenburg D. 3D forward modeling and inversion of CSEM data at the San Nicolas massive sulphide deposit[J]. 4th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics,2007.185~188.
- [19]Pospeeva E V. Application of Medium-scale Magnetotelluric Sounding to Identify Deep Criteria for Promising Areas for Kinmberlite Exploration[J]. Russian Journal of Pacific Geology,2008.2(3):205~217.
- [20]Heinson G S, Direen N G, Gill R M. Magnetotelluric evidence for a deep-crustal mineralizing system beneath the Olympic dam iron oxide copper-gold deposit, southern Australia[J]. Geological Society of America,2006.34(7):573~576.
- [21]王大勇,李桐林,高远,等.CSAMT 法和 TEM 法在铜陵龙虎山地区隐伏矿勘探中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2009.39(6):1134~1140.
- [22]于泽新,敖颖峰,吕景增,等.CSAMT 法在辽西康杖子区深部探矿中的应用[J].地质与勘探,2009.45(5):600-605.

- [23] 李宁生,赵福元,仵阳等.大功率激电在金属矿深部找矿中的应用[J].石油天然气学报,2013.35(8):54-56.
- [24] 叶益信,邓居智,李曼等.电磁法在深部找矿中的应用现状及展望[J].地球物理学进展,2011,26(1):327-334.
- [25] 赵国泽,陈小斌,汤吉等.中国地球电磁法新进展和发展趋势[J].地球物理学进展,2007,22(4):1171-1180.
- [26] Li Y G, Oldenburg D W. 3-D inversion of gravity data[J].Geophysics,1998.63(1): 109~119.
- [27] Li Y G, Oldenburg D W. 3-D inversion of magnetic data[J].Geophysics,1996,61(2): 394~408.
- [28] 姚长利,郑元满,张聿文等.重磁异常三维物性反演随机子域法方法技术[J].地球物理学报,2007.50(5):1576-1583.
- [29] Hornby P, Boschetti F, Horowitz F. Analysis of potential field data in the wavelet domain[J]. Geophys,1999.137(1):175~196.
- [30] Archibald N, Gow P, Boschetti F. Multiscale edge analysis of potential data[J]. Exploration Geophysics,1999.30(2):38~44.
- [31] Hornby P, Boschetti F, Horowitz F. Developments in the analysis of potential field data via multiscale edge representation(in Exploration beyond 2000; conference handbook) Preview 2000,84,77.
- [32] Holden D J, Archibald N J, Boschetti F, et al. Inferring geological structures using wavelet-based multiscale edge analysis and forward models[J]. Exploration Geophysics,2000,31(4):617~621.
- [33] Austin J R, Blenkinsop T G. The Cloncurry Lineament: Geophysical and geological evidence for a deep crustal structure in the Eastern Succession of the Mount Isa Inlier[J]. Precambrian Research,2008.163(1-2):50~68.
- [34] 严加永,吕庆田,孟贵祥等.基于重磁多尺度边缘检测的长江中下游成矿带构造格架研究[J].地质学报,2011.85(5):900-914.
- [35] 邓震,吕庆田,严加永等.九江—瑞昌矿集区的3D结构及对区域找矿的启示[J].地球物理学报,2012.55(12):4169-4180.
- [36] Pretorius C C, Trewick W F, Fourie A, Irons C. Application of 3-D seismic to mine planning at Vaal Reefs gold mine, number 10 shaft, Republic of South Africa[J]. Geophysics,2000.65(6):1862~1870.
- [37] Stuart G W, Jolley S J, Polome L G. Application of 3-D seismic attributes analysis to mine planning: Target gold deposit, South Africa[J]. The Leading Edge 2000.19(7): 736~742.
- [38] White D, Boerner D, Wu J J, et al. Mineral exploration in the Thompson nickel belt, Manitoba, Canada, using seismic and controlled-source EM methods[J]. Geophysics, 2000. 65(6): 1871~1881.
- [39] Milkereit B, Berré E K, King A R, et al. Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel-copper deposits - A case history from the Sudbury basin, Canada[J]. Geophysics, 2000. 65(6):1890~1899.
- [40] 肖骑彬,蔡新平,徐兴旺.浅层地震与MT联合技术在隐伏金属矿床定位预测中的应用——以新疆哈密图拉尔根铜镍矿区为例[J].矿床地质,2005.24(6):676~683.
- [41] 王大勇.长江中下游矿集区综合地质地球物理研究[D].吉林大学,2010.
- [42] 崔彬,李忠文.江西九瑞地区铜金成矿系列[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.1~130.
- [44] 钟良水.江西九瑞铜金矿床控矿条件及成矿预测[J].地质与勘探,1991.27(9):1~8.

- [43]王会敏;李永明;罗春林.江西九瑞地区铜多金属矿整装勘查区成矿规律与找矿靶区优选[J].资源调查与环境,2012.33(4):245~253.
- [44]Peters L J. The direct approach to magnetic interpretation and its practical application[J]. Geophysics,1949.14(3):290~320.
- [45]曾华霖,许德树.最佳向上延拓高度的估计[M].地学前缘,2002.9(2):499-503.
- [46]申宁华,管志宁.磁法勘探问题[M].北京:地质出版社,1985.329~335.
- [47]郭志宏.航磁及梯度数据正反演解释方法技术实用改进及应用[D].北京:中国地质大学,2004.
- [48]陈乐寿,王光镔.大地电磁测深法[M].北京:地质出版社,1990.1~246.
- [49]谭红艳,吕骏超,刘桂香等.EH4 音频大地电磁测深方法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用[J].地质与勘探,2011.47(6):1133-1141.
- [50]郭新红,邱崇涛,杨明等.音频大地电磁测深法在新疆阿尔玛勒煤矿采空区勘查中的应用[J].物探与化探,2013.37(2):373-376.
- [51]刘红涛,杨秀瑛,于昌明,叶杰,刘建明,曾庆栋,石昆法.用 VLF、EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿—以赤峰柴胡栏子金矿床为例[J].地球物理学进展,2004.19(2):276~285.
- [52]Basokur A T, Rasmussen T M, Kaya C, Altun Y, Aktas K. Comparison of induced polarization and controlled source audio magnetotellurics methods for massive chalcopyrite exploration in a volcanic area[J]. Geophysics,1997.62(4):1087~1096.
- [53]Anderson K E, Dickinson J E, Edge R D, Macy J P, Maraj S, Sternberg B K, Stokes P J, Thurner S M. Controlled source audio magnetotelluric (CSAMT) geophysical investigation in the upper San Pedro basin, southeastern Arizona[J]. Abstracts with Programs Geological Society of America,2008.40(6):129~137.
- [54]李茂,杜建农,余水泉.CSAMT 法在松辽盆地四平地区铀矿勘查中的应用[J].物探与化探,2006.30(4):298~302.
- [55]杨瑞西,马振波,司法祯,李志勋,许国丽.CSAMT 法在铝土矿勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2008.5(4):400~407.
- [56]刘国印,燕长海,赵健敏,王纪中,李中明.微重力法与可控源音频大地电磁法组合在豫西寻找隐伏铝土矿中的应用[J].地质通报,2008.27(5):641~648.
- [57]Rodi W L, Mackie R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion[J]. Geophysics,2001.66(1):174~187.
- [58]Mackie R L, Smith J T, Madden T R. Three-dimensional electromagnetic modeling using difference equations: The magnetotelluric example[J]. Radio Science, 1994.29(4):923~935.
- [59]PolakE. Computational methods in optimization: A unified approach: Academic Press.1971.